

การประมาณค่าแรงบิดโหดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์  
โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้



นายธนากร บุญทัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2558

**LOAD TORQUE ESTIMATION EXERTED ON JOINTS  
OF ROBOTIC ARM USING ADAPTIVE  
COMPENSATION**

**Thanakorn Boontan**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechatronic Engineering  
Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2015**

การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์  
โดยใช้วิธีการหาค่าแบบปรับตัวได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.โสภณา แจ้งการ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธนกร บุญทัน : การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (LOAD TORQUE ESTIMATION EXERTED ON JOINTS OF ROBOTIC ARM USING ADAPTIVE COMPENSATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 98 หน้า.

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการนำแขนกลของหุ่นยนต์มาใช้ในสายการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เป็นต้น การทำงานของแขนกลหุ่นยนต์จำเป็นต้องอาศัยแรงบิดบนข้อต่อที่สัมพันธ์กับการขับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจะส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการขับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่และอายุการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์ได้ ในทางปฏิบัติแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensation) เพื่อประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่เคลื่อนที่ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไม่ให้ภาระโหลดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ และเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป

THANAKORN BOONTAN : LOAD TORQUE ESTIMATION EXERTED  
ON JOINTS OF ROBOTIC ARM USING ADAPTIVE COMPENSATION.

ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 98 PP.

LOAD TORQUE ESTIMATION/ADAPTIVE COMPENSATION AND OBSERVER

Currently, the robotic arm are widely used in the industrial sector mainly such as automobile part industry, hard disks drive industry and chemicals industry, etc. The operation of robotic arm are requires the torque on joints that associate with driving of the motor movement. The performance of the robotic arm are reduced by the effect of Variable torque. Affecting the electrical consumption driver of the motor movement and the lifetime of the robotic arm. Generally, the variable torque of a motor is difficult to measure in practice but it can be estimated. This research projects demonstrated a method for load torque estimation exerted on the joints of the robotic arm using adaptive compensation. When can estimate the load torque exerted on the joints of robotic arm while on movement. It is useful to design the trajectory of robotic arms, to do not exceed the load exerted on the joints and increase the lifetime of the operation. This results of the study can be used to improve and develop the performance of the robotic arm.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆที่  
ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ และ  
คำปรึกษาแนะนำในการทำวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาตลอดและ  
สละเวลาตรวจสอบข้อแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ใน  
การดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว  
และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งใน  
อดีตจนถึงปัจจุบัน

คุณนิติศักดิ์ หนูมาน้อย พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ในกลุ่มวิจัย System and Control Engineering  
Laboratory ที่ให้ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ทั้งวิชาความรู้ด้านงานวิจัย และช่วยเหลือในทุก ๆ  
ด้าน และ คุณลลิตา คำคุณ ที่ช่วยตรวจสอบการจัดรูปแบบเล่มวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่ออำนาจ บุญทัน และคุณแม่ธีรรัตน์ บุญทัน รวมถึง  
ครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริม และให้โอกาสทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดย  
ตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ธนากร บุญทัน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	2
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 พื้นฐานวิทยาการหุ่นยนต์	4
2.1.1 การจำแนกหุ่นยนต์แบบแขนกลตามลักษณะขอบเขตการทำงาน	5
2.1.2 ลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์	8
2.2 ระบบควบคุม	9
2.2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด	9
2.2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	10
2.3 ตัวสังเกต	12
2.3.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม	13
2.4 การควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองโดยใช้วิธี Gradient Method	16

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	ปรีทศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.6	สรุป .....	20
<b>3</b>	<b>แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบ .....</b>	<b>21</b>
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	21
3.1.1	แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง.....	21
3.1.2	มอเตอร์กระแสตรง.....	22
3.1.3	บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์.....	23
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	23
3.3	ตัวสังเกต.....	26
3.4	การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธี Gradient Method.....	28
<b>4</b>	<b>ผลการจำลองสถานการณ์.....</b>	<b>32</b>
4.1	การประมาณค่าตัวแปรของระบบ.....	32
4.2	ตัวแปรของตัวสังเกต.....	35
4.3	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี.....	39
4.4	ตัวแปรตัวหาคะแบบปรับค่าได้ด้วยวิธี Gradient Method.....	40
4.5	การจำลองสถานการณ์ประมาณค่าโหลดของแขนกลหุ่นยนต์.....	42
4.6	สรุป.....	47
<b>5</b>	<b>ผลการทดสอบการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อ ของแขนกลหุ่นยนต์.....</b>	<b>48</b>
5.1	เครื่องมือการทดลองและการติดตั้ง.....	48
5.2	การทดลองการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกล จากตำแหน่ง (-0.14,0.2) ไปยัง (-0.22,0.24).....	50
5.2.1	ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 1.....	52



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 2	53
5.2.3 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 3	54
5.3 การทดลองการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกล จากตำแหน่ง $(-0.34, 0)$ ไปยัง $(-0.26, 0.21)$	56
5.3.1 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 1	58
5.3.2 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 2	59
5.3.3 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 3	60
5.4 การทดลองการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกล จากตำแหน่ง $(0, 0.34)$ ไปยัง $(-0.2, 0.27)$	62
5.4.1 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 1	64
5.4.2 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 2	65
5.4.3 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 3	66
5.5 สรุป	68
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	70
6.1 สรุป	70
6.2 ข้อเสนอแนะ	70
รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation	74

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแกนกลสององศาอิสระ .....	81
ภาคผนวก ค ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board และการติดตั้ง Hardware .....	84
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	89
ประวัติผู้เขียน .....	98



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของข้อต่อหุ่นยนต์.....	4
2.2 ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ที่ขึ้นอยู่กับแกนหลัก.....	7
2.3 คุณลักษณะของหุ่นยนต์.....	8
5.1 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีดีและผลการตอบสนองการควบคุมมุมในการเคลื่อนที่.....	52
5.2 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1.....	55
5.3 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2.....	56
5.4 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีดีและผลการตอบสนองการควบคุมมุมในการเคลื่อนที่.....	58
5.5 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1.....	61
5.6 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2.....	62
5.7 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีดีและผลการตอบสนองการควบคุมมุมในการเคลื่อนที่.....	64
5.8 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1.....	68
5.9 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2.....	68

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน..... 5
2.2	หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก..... 5
2.3	หุ่นพิกัดทรงกลม..... 6
2.4	หุ่นยนต์สกร่า..... 6
2.5	หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน..... 7
2.6	หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน 2 องศาอิสระ..... 8
2.7	การควบคุมระบบ..... 9
2.8	ระบบควบคุมแบบเปิด..... 9
2.9	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ..... 10
2.10	ตัวควบคุมแบบสัดส่วน..... 10
2.11	ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล..... 11
2.12	ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์..... 12
2.13	แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต..... 15
2.14	แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS..... 17
3.1	แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง..... 22
3.2	ระยะการเคลื่อนที่ของแขนกลของงานวิจัยนี้..... 22
3.3	อุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 22
3.4	บอร์ด RAPCON, แอปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover เข้าสู่ PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์..... 23
3.5	แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 24
3.6	แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็ม..... 26
3.7	แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง..... 31
4.1	การเปรียบเทียบระบบจำลองโดยวิธีระบุเอกลักษณ์ และสัญญาณจริงของระบบข้อต่อที่ 1..... 34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 การเปรียบเทียบระบบจำลองโคบิวิธีระบุเอกลักษณ์ และสัญญาณจริงของระบบข้อต่อที่ 2	35
4.3 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อประมาณแรงบิดโหลด	41
4.4 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1	42
4.5 ผลตอบสนอง $\theta(t)$ และ $\dot{\theta}(t)$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1	42
4.6 ผลตอบสนอง $\hat{T}_L$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1	43
4.7 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 2	43
4.8 ผลตอบสนอง $\theta(t)$ และ $\dot{\theta}(t)$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 2	44
4.9 ผลตอบสนอง $\hat{T}_L$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 2	44
4.10 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1	45
4.11 ผลตอบสนอง $\theta(t)$ และ $\dot{\theta}(t)$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1	45
4.12 ผลตอบสนอง $\hat{T}_L$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1	45
4.13 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 2	46
4.14 ผลตอบสนอง $\theta(t)$ และ $\dot{\theta}(t)$ สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 2	46
4.15 ผลตอบสนอง $\hat{T}_L$ สำหรับข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 4.5.2	47
5.1 แกนกลหุ่นยนต์สองอิสระ สำหรับการทดลอง	49
5.2 ข้อมูลของแกนกลหุ่นยนต์ที่ใช้การทดลอง การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแกนกล	49
5.3 บอร์ด RAPCON, อแดปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover	49
5.4 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ กรณีที่ 5.2	50
5.5 ผลการตอบสนองการควบคุมมุมข้อต่อที่ 1	51
5.6 ผลการตอบสนองการควบคุมมุมข้อต่อที่ 2	51
5.7 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 1	52
5.8 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 1	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2.....	53
5.10 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2.....	54
5.11 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3.....	54
5.12 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3.....	55
5.13 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ กรณีที่ 5.3.....	56
5.14 ผลการตอบสนองการควบคุมมุมข้อต่อที่ 1.....	57
5.15 ผลการตอบสนองการควบคุมมุมข้อต่อที่ 2.....	57
5.16 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 1.....	58
5.17 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 1.....	59
5.18 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2.....	59
5.19 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2.....	60
5.20 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3.....	60
5.21 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 3.....	61
5.22 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ กรณีที่ 5.4.....	62
5.23 ผลการตอบสนองการควบคุมมุมข้อต่อที่ 1.....	63
5.24 ผลการตอบสนองการควบคุมมุมข้อต่อที่ 2.....	64
5.25 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 1.....	65
5.26 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 1.....	65
5.27 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 2.....	66
5.28 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณีที่ 2.....	66
5.29 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3.....	67
5.30 ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณีที่ 3.....	67
ก1 แผนภาพการจำลองระบบเทียบเท่าใน Simulink.....	75
ก2 แผนภาพหน้าต่างของ Control and Estimation Tools Manager.....	75
ก3 แผนภาพหน้าต่างของการเลือก New Data.....	76
ก4 แผนภาพหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า.....	76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก5 แผนภาพหน้าตาการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณ	77
ก6 แผนภาพหน้าตาการสร้าง New Estimation	77
ก7 แผนภาพหน้าตาการเลือกข้อมูลในการ Estimate	78
ก8 แผนภาพหน้าตาการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณ	78
ก9 แผนภาพการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร	79
ก10 แผนภาพการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร	79
ก11 แผนภาพค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้	80
ข1 โปรแกรมการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลข้อต่อที่ 1	82
ข2 โปรแกรมการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลข้อต่อที่ 2	83



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$x$	=	อัตราการปรับตัวของวิธีการ Gradient Method
$'$	=	อัตราส่วนความหน่วง
$\dot{S}_n$	=	ความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกต
$S$	=	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$\dot{S}$	=	ความเร็วที่ได้จากการประมาณค่า
$"$	=	ค่ามุมมองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$\hat{"}$	=	ค่ามุมมองที่ได้จากการประมาณค่า
$b$	=	ความหน่วง
$i_a$	=	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์
$\hat{i}_a$	=	กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการประมาณค่า
$I$	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
$J$	=	Loss Function
$K$	=	อัตราขยายของระบบ
$K_b$	=	ค่าคงที่ของ Electromotive Force
$K_t$	=	ค่าคงที่ของแรงบิด
$L$	=	เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต
$L_a$	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์
$MRAS$	=	Model-Reference Adaptive Control
$R_a$	=	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์
$T_L$	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง
$\hat{T}_L$	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณค่า
$V_a$	=	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์
$V_b$	=	ความต่างศักย์ back emf
$e$	=	ค่าความผิดพลาดระหว่างระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกต



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการนำแขนกลของหุ่นยนต์มาใช้ในสายการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมประกอบเครื่องจักร และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เป็นต้น การทำงานของแขนกลหุ่นยนต์จำเป็นต้องอาศัยแรงบิดบนข้อต่อที่สัมพันธ์กับการจับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ ในการใช้งานจริงระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับผลกระทบจากค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (Variable Torque) เกิดขึ้นอยู่เสมอ ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง ระบบควบคุมโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้วิธีการเพิ่มค่าสัญญาณควบคุมและกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมการตอบสนองให้เป็นไปตามต้องการทั้งในส่วน of แรงบิด และความเร็วรอบในกรณีที่ มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ โดยไม่มีการพิจารณาในส่วน of ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการจับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่และอายุการใช้งานของแขนกล หุ่นยนต์ได้ ในทางปฏิบัติแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอ วิธีการในการประมาณค่าแรงบิด โหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensation) เพื่อประมาณค่าแรงบิด โหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเราสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงแรงบิด โหลดที่กระทำบน ข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ในขณะเคลื่อนที่ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของ แขนหุ่นยนต์ไม่ให้ภาระ โหลดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และเป็นเพิ่มอายุการใช้งาน ของหุ่นยนต์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแกนกลหุ่นยนต์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงกับการชดเชยแบบปรับตัวได้

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เป็นค่าจากการประมาณ
2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และการทดลองจริงเขียนจากโปรแกรม MATLAB 7 ในส่วนของ Simulink
3. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะพิจารณาผลกระทบของอุปกรณ์อื่นในลักษณะที่เป็นค่าคงที่ในระบบของชุดควบคุม
4. ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการทดสอบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Rabcon เป็นตัวควบคุม

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์และออกแบบวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้
2. สร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และทดลอง เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink
3. จำลองสถานการณ์และทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบการทดลองแกนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ
4. สามารถประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแกนกลหุ่นยนต์โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบการทดลองแกนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การประมาณค่าแรงบิดบนข้อต่อแกนกลหุ่นยนต์ด้วยตัวชดเชยค่าแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้ ของมอเตอร์กระแสตรง
2. การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและตัวแปรสเตรนในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### 1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการทำงานของตัวสังเกต การประมาณค่าตัวแปรของระบบ รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และ ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 ผลการทดสอบระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และเปรียบเทียบผล

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำได้หลายวิธีการ ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสเตรคของระบบด้วยตัวสังเกต การชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ซึ่งได้จากการประมาณให้กับตัวสังเกตจะ ทำให้ความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสเตรคของระบบโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

หลักการในการออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะประยุกต์จากหลักการของการควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง โดยตั้งสมมุติฐานว่าตัวแปรทุกตัวในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ และมีเพียงค่าของตัวแปรแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้นที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### 2.1 พื้นฐานวิทยาการหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ที่มีในปัจจุบันนี้มีหลากหลายและเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีความต้องการในท้องตลาดมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นความรู้พื้นฐานวิทยาการหุ่นยนต์จึงมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน การแบ่งแยกประเภทของหุ่นยนต์อาจจำแนกกว้าง ๆ ได้ 2 ประเภท คือจำแนกตามเทคโนโลยีการขับเคลื่อนและจำแนกตามรูปร่างและขอบเขตการทำงานสุทธิ ในโครงงานนี้พิจารณาจำแนกตามขอบเขตการทำงานสุทธิ ซึ่งขอบเขตการทำงานสุทธิ หมายถึง ขอบเขตในปริภูมิสามมิติที่ข้อมือของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้นได้ จะเรียกแกนของ 3 ข้อต่อแรกของแขนกลว่า แกนหลัก ซึ่งสามารถพิจารณาดำเนินขอบเขตการทำงานได้จากลำดับชนิดของข้อต่อที่ใช้ใน 3 แกนแรก ข้อต่อมีหลายแบบ แต่ที่เป็นพื้นฐานและนิยมใช้มี 2 แบบ ดังตารางที่ 2.1

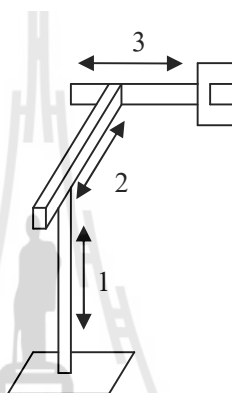
ตารางที่ 2.1 ชนิดของข้อต่อหุ่นยนต์

ชนิด	เครื่องหมาย	สัญลักษณ์	การเคลื่อนที่
ข้อต่อหมุน (Revolute)	R		หมุนรอบแกน
ข้อต่อเลื่อน (Prismatic)	P		เชิงเส้นตามแนวแกน

เพื่อสามารถเลือกใช้งานหุ่นยนต์ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องทราบการจำแนกหุ่นยนต์แบบแขนกลตามลักษณะขอบเขตการทำงานดังจะอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

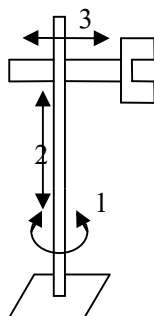
### 2.1.1 การจำแนกหุ่นยนต์แบบแขนกลตามลักษณะขอบเขตการทำงาน

1. หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียนหรือหุ่นยนต์พิกัดฉาก (Cartesian – coordinate robot หรือ Rectangular – coordinate robot) สัญลักษณ์ PPP ดังรูปที่ 2.1 โดยข้อมือจะเลื่อน ขึ้น-ลง, เข้า-ออกและ เดินหน้า-หลังทำให้พื้นที่การทำงานมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมุมฉาก



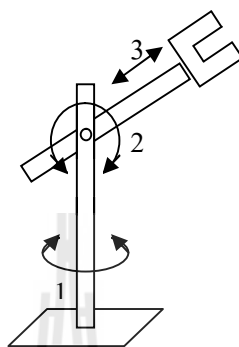
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน

2. หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical - coordinate robot) สัญลักษณ์ RPP ดังรูปที่ 2.2 สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงข้างบนได้ตามแกนตั้งที่เป็นหลักสามารถเคลื่อนที่เข้าออกตามแนวรัศมี และ แขนหมุนรอบแกนตั้งฉากกับฐานได้ พื้นที่การทำงานจึงเป็นแบบทรงกระบอก



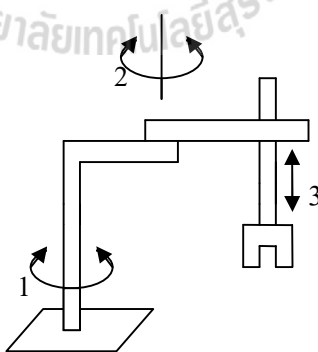
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก

3. หุ่นยนต์พิกัดทรงกลม (Spherical - coordinate robot) สัญลักษณ์ RRP แสดงดังรูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนจะสามารถยกขึ้นลงได้ในแนวดิ่ง โดยยกทำมุมกับฐานแขนสามารถหมุนได้รอบแกนแนวดิ่งของฐาน พื้นที่การทำงานเป็นแบบทรงกลม



รูปที่ 2.3 หุ่นพิกัดทรงกลม

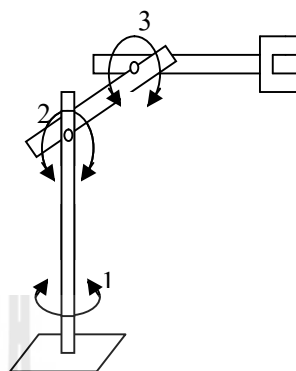
4. หุ่นยนต์สการ์ว (SCARA : Selective Compliance Assembly Robot Arm) ดังรูปที่ 2.4 มีลักษณะคล้ายหุ่นยนต์พิกัดทรงกลม มีสัญลักษณ์ RRP แต่แกนทั้ง 3 จะอยู่ในแนวดิ่งโดยข้อต่อที่ 2 ทำให้แขนหมุนรอบแกนตั้งในแนวนอน เหมือนการหมุนของข้อต่อแรก ภาพตัดขวางในแนวนอนของพื้นที่การทำงานค่อนข้างกว้างซับซ้อนขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของสองแกนแรก



รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์สการ์ว

5. หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน (Articulate - coordinate robot หรือ Revolute robot) ดังรูปที่ 2.5 สัญลักษณ์ RRR ทั้ง 3 ข้อเป็นข้อต่อหมุน หุ่นยนต์แบบนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับแขนมนุษย์มากที่สุด

มีข้อหมุนต่าง ๆ เหมือนกัน ดังนั้นพื้นที่การทำงานจึงสามารถที่จะทำงานได้ในทุกตำแหน่งในระยะความยาวของแขน



รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน

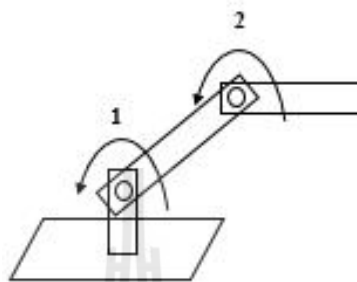
ข้อดี-ข้อเสีย ของหุ่นยนต์แต่ละชนิดนี้แตกต่างกันออกไป เพราะลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันแต่ถ้ามองในแง่ของการทำงานที่เป็นแบบซ้ำ ๆ ที่เดิมตลอด หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน หรือหุ่นยนต์พิกัดฉาก จะสามารถทำงานได้ดีกว่า คือสามารถเคลื่อนที่ไปหาเป้าหมายโดยมีความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่ถ้ามองในแง่การเข้าถึงวัตถุชนิดพิกัดทรงกลม และข้อต่อหมุน หมุน จะสามารถเข้าถึงวัตถุได้มากกว่า

จากการจำแนกหุ่นยนต์ดังอธิบายข้างต้นสามารถสรุปการทำงานของแขนกลทั้ง 5 แบบได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ที่ขึ้นอยู่กับแกนหลัก

ประเภทแขนกล	แกน 1	แกน 2	แกน 3	จำนวนข้อต่อหมุน
พิกัดคาร์ทีเซียน	P	P	P	0
พิกัดทรงกระบอก	R	P	P	1
พิกัดทรงกลม	R	R	P	2
สกรู	R	R	P	2
ข้อต่อหมุน	R	R	R	3

เมื่อพิจารณาลักษณะของการทำงานของหุ่นยนต์และการจำแนกหุ่นยนต์ พื้นฐานทั้ง 5 ประเภทข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกพัฒนาหุ่นยนต์ข้อต่อหมุนซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแขนมนุษย์มากที่สุด ซึ่งเป็นข้อหมุนทั้งหมดเหมือนกัน และพื้นที่ในการทำงานสามารถจะทำงานได้ในทุกตำแหน่งในระยะความยาวของแขน ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หุ่นยนต์ข้อต่อหมุนสององศาอิสระ สัญลักษณ์ RR ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน 2 องศาอิสระ

โดยหุ่นยนต์ข้อต่อหมุนสององศาอิสระมีรูปแบบคล้ายแขนคน โดยประกอบด้วย ข้อต่อที่ 1 คือ ท่อนแขนด้านบน ข้อต่อที่ 2 คือ ท่อนแขนด้านล่าง

### 2.1.2 ลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์

นอกจากเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้การแบ่งประเภทของหุ่นดังที่กล่าวมาแล้ว คุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญในการเลือกใช้หุ่นยนต์แสดงดังตารางที่ 2.3

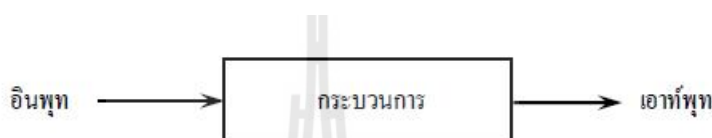
ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของหุ่นยนต์

คุณลักษณะ (Characteristics)	หน่วย (Unit)
จำนวนแกน	-
ความสามารถในการยกน้ำหนัก	Kg
ความเร็วสูงสุด	mm / sec
ระยะเอื้อมถึงและสโตรก	Mm
การหมุนของเครื่องมือ	Deg
การซ้ำตำแหน่งเดิม	Mm
ความละเอียดและความแม่นยำ	Mm



## 2.2 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามที่เราต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตหรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (Process) ที่เราต้องการที่จะควบคุมสามารถแทนที่ได้ด้วยบล็อก (Block) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบมักแทนด้วยสัญญาณโดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต



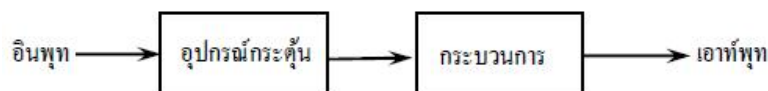
รูปที่ 2.7 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop Control System)
2. ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

### 2.2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด

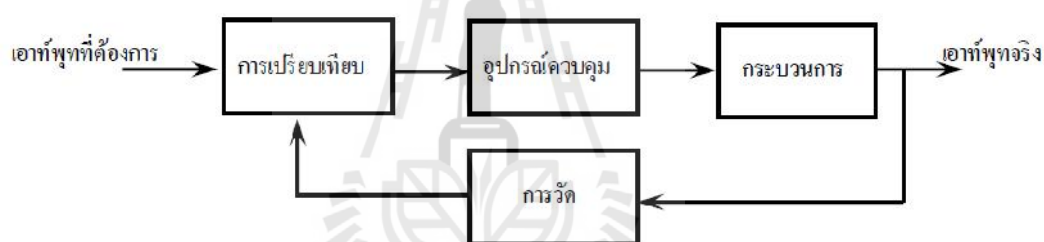
เป็นการใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองที่เราต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบเปิด

### 2.2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

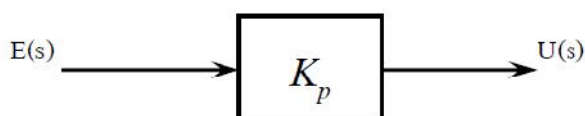
ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาต์พุตได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อเราทราบค่าเอาต์พุตแล้วเรามักจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงจะถูกส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราจะได้ว่าค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

#### 2.2.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control, P-control)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม ( $u$ ) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด ( $e$ ) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ต้องการควบคุม แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบสัดส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

$$u(t) = K_p e(t)$$

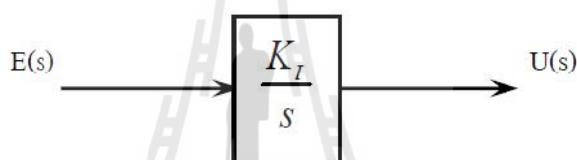
เมื่อ  $K_p$  จะเป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่าเกนสัดส่วน

ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller) คือลดค่าความผิดพลาดของระบบ โดย สามารถตอบสนองกับค่าสัญญาณความผิดพลาดอย่างทันทีทันใด

### 2.2.2.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีรูปแบบสมการ คือ  $u(t) = K_I \int e(t) dt$  เมื่อ  $K_I$  คือค่าคงที่ของตัวควบคุม แบบอินทิกรัล แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลแสดงดังรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

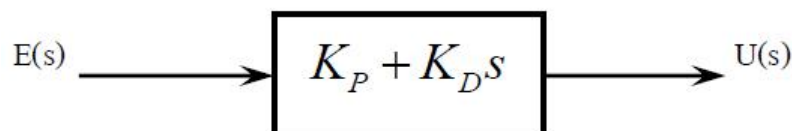
จากรูปแบบการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม  $u(t)$  จะมีค่ามากโดยที่สัญญาณความ ผิดพลาด  $e(t)$  มีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณการควบคุมในกรณีของ การควบคุมแบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (past value) ไม่เหมือนกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน

ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ใน ขณะเดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วยการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเป็นการเพิ่มอันดับ ให้กับระบบของเรา เช่น ในกรณีระบบเป็นอันดับที่หนึ่ง และเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Controller) แล้วระบบป้อนกลับจะมีอันดับเป็นสอง

### 2.2.2.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์ มีรูปแบบสมการ คือ  $u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}$  เมื่อ  $K_D$  คือค่าคงที่ของตัวควบคุม แบบอนุพันธ์ ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัว

ควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งเรียกว่าตัว ควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์หรือ (PD-controller) ดังแสดงในรูปที่ 1.12 ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลก็จะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลหรือ (PI-controller) และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เรียกว่า (PID-controller)



รูปที่ 2.12 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นคือ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณความผิดพลาดนี้มีสัญญาณ ราบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (fluctuate) ก่อนข้างมาก (เนื่องจากค่าความชัน (slope) ของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแปลงก่อนข้างมาก) ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

### 2.3 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต (State-Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสแตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสแตตหรือสัญญาณสแตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้ แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต (State Estimator) หรือ ตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่จะทำการควบคุมวิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce-Order Observer) เมื่อต้องการ

ทราบค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสแตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยใช้ค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้บางสแตตเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

### 2.3.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-order observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสแตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสแตตของตัวเองได้ แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open-Loop Observer)

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเขียนในรูป State Space Form ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}A &= \text{เมตริกซ์สแตตของระบบ } [n \times n] \\ B &= \text{เมตริกซ์อินพุตของระบบ } [n \times 1] \\ C &= \text{เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ } [1 \times n] \\ x &= \text{สแตตเวกเตอร์ของระบบ } [n \times 1] \\ u &= \text{อินพุตของระบบ } [1 \times 1] \\ y &= \text{เอาต์พุตของระบบ } [1 \times 1]\end{aligned}$$

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\tag{2.2}$$

เมื่อ  $L =$  เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

$\hat{x} =$  ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.5)$$

เมื่อ  $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ  $x - \hat{x} \rightarrow 0$  จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสถานะซึ่งวัดได้จากระบบจริง และตัวสังเกตหมดไปผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสถานะในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้

$$\text{Observability matrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ระบบใดๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ  $n$  ( $\text{Rank} \begin{bmatrix} \cdot \end{bmatrix} = n$ ) เมื่อ  $n$  คือ อันดับของระบบหรือของเมตริกซ์  $A$

สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต(Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

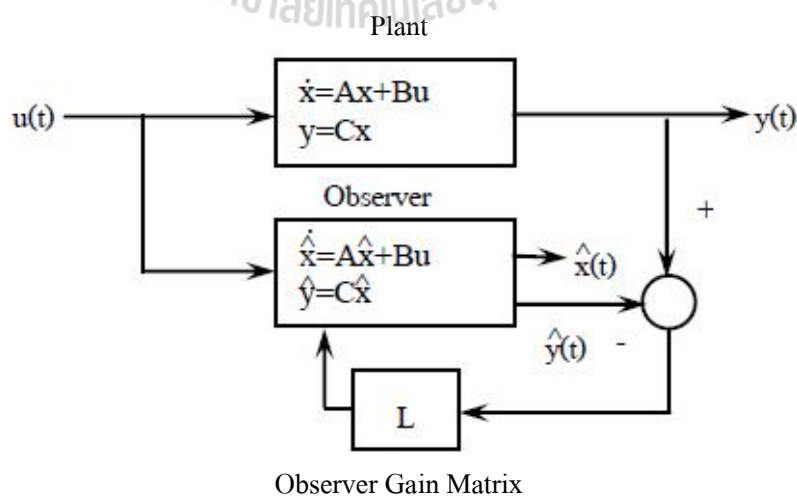
$$L = w(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$q(s) = s^n + r_1 s^{n-1} + \dots + r_{n-1} s + r_n \quad (2.8)$$

$$q(A) = A^n + r_1 A^{n-1} + \dots + r_{n-1} A + r_n \quad (2.9)$$

หลักการทำงานของตัวสังเกตคือจะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบ ค่าตัวแปรสถานะภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกต และตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสถานะที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกต เพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้างของตัวสังเกต



รูปที่ 2.13 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

เมื่อ  $L$  = ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

$u(t)$  = ค่าอินพุทของระบบ  $[1 \times 1]$

$y(t)$  = ค่าเอาต์พุทของระบบ  $[1 \times 1]$

$\hat{y}(t)$  = ค่าเอาต์พุทของตัวสังเกต  $[1 \times 1]$

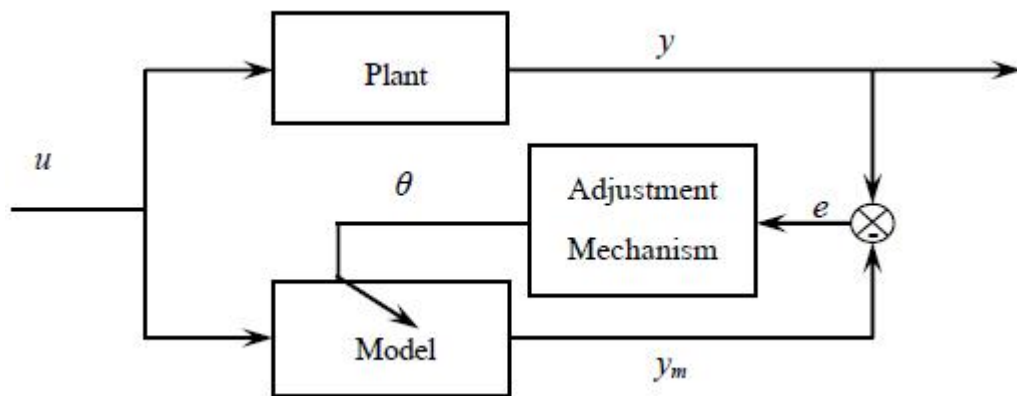
$\hat{x}(t)$  = ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกตซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือการกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือสัญญาณประมาณ  $\hat{x}(t)$  จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสแตตจิกหรือ  $x(t)$  ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่ารูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form) ได้ จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

## 2.4 การควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) โดยใช้วิธีการ Gradient Method

การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักในการทำงานคือจะปรับค่าตัวแปรต่างๆภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาต์พุทของแบบจำลอง (Model) และระบบที่ต้องการ (Plant) หดไป จากรูปที่ 2.14 ให้เอาต์พุทของแบบจำลองเป็น  $y_m$  เอาต์พุทของระบบเป็น  $y$  และ  $e$  เป็นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุททั้งสอง (error) และมีตัวแปรที่ทำการปรับค่า คือ  $\theta$





รูปที่ 2.14 แผนภาพหลักการทำงาน MRAS

การปรับค่าตัวแปร ( $\theta$ ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหมดไป โดยกำหนดให้ Loss function ( $J$ ) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.10)$$

การปรับค่าของของตัวแปร ( $\theta$ ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.11)$$

$$e = y - y_m \quad (2.12)$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \quad (2.13)$$

โดยที่  $-\gamma$  คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎีของ Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function ( $J$ ) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบ และแบบจำลองหมดไปโดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการ

ปรับตัวซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

## 2.5 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานได้ตามต้องการ ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะงาน และความเหมาะสม ตัวควบคุมที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมบางประเภทต้องการค่าของตัวแปรสแตตเพื่อที่จะทำการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง และการที่ต้องการค่าของตัวแปรสแตตเป็นที่มาของการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่าเนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีราคาแพง และลดความซับซ้อนในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ในภาวะการทำงานจริงมักมีแรงบิดจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเข้ามารบกวนระบบ ซึ่งแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้การประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาด และลดประสิทธิภาพในการทำงานของตัวควบคุมลง จากแนวคิดในการที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนระบบ ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งใช้หลักการของการควบคุมปรับตัว

Jong Sun Ko (1995) และคณะ ได้นำเสนอ การควบคุมตำแหน่งของ Brushless DC Motor โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ด้วยทฤษฎีของ Lyapunov ร่วมกับตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยการควบคุมกระแสแบบ Feed Forward Compensator เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ เนื่องจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ ผลที่ได้คือ ตัวสังเกตสามารถปรับตัว และอ้างอิงตามสัญญาณจริงได้ นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์เป็นไปตามตำแหน่งที่ต้องการค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

Kichul Hong and Kwanghee Nam (1998) ได้นำเสนอการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและแรงบิดที่เข้ามารบกวนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานระบบควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor) ในสถานะที่มีแรงบิดเข้ามารบกวนแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา และประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากเวลาประวิง (Time Delay) ผลที่ได้คือการตอบสนองของความเร็วรอบมีความรวดเร็วมากขึ้นและลดการแกว่งตัวของการตอบสนองในสถานะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนกับระบบรวมทั้งสามารถลดผลกระทบจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบที่เกิดจาก Bandwidth ของระบบที่มีค่ามากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Gheorghe Daniel (2003) และคณะได้นำเสนอ การควบคุมการควบคุมมอเตอร์ให้มอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่มอเตอร์ที่ใช้จะมีเซนเซอร์วัดตำแหน่งและให้เคลื่อนที่แบบจลน์ โดยมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้าไปปรับกวนระบบ เนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อย ระบบจะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและจะประมาณค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่เกิดจากโมเมนต์ความเฉื่อย ผลที่แสดงตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่และมีเสถียรภาพในขณะที่มีแรงบิดแบบชั่วคราวเข้ามาปรับกวนระบบและมอเตอร์มีการเคลื่อนที่แบบจลน์

Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005) ได้นำเสนองานวิจัย เรื่องการควบคุมแรงบิดของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดแบบง่ายและตัวควบคุมแรงบิดแบบมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของ Lyapunov Technique (integral action) เพื่อการันตีเสถียรภาพของระบบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นการออกแบบที่ประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองของวิธีการ Lyapunov สำหรับระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ถึงแม้จะมีความไม่แน่นอนหรือความปั่นป่วนของพารามิเตอร์ ผลการจำลองก็ยังยืนยันประสิทธิภาพของการควบคุมที่มีประสิทธิภาพของระบบ

Srisertpol, J., and Khajomtraidet, C. (2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง จากผลการจำลองระบบและการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการชดเชยแบบปรับตัวได้สองวิธีการ คือ Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method จากผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีการสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Chin Chih Ou and Tien Chi Chen (2012) ได้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ของรถเข็นผู้ป่วยให้เคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ เพื่อลดการใช้กำลังแขนที่มากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือปวดหัวไหล่จากการใช้กำลังแขนเพื่อให้รถเคลื่อนที่ในกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาปรับกวนระบบ ซึ่งจะส่งผลในการเคลื่อนที่ของรถเข็น เพื่อทำการคำนวณแรงที่ต้องเพิ่มเข้าไปให้กับรถเข็นให้รถเข็นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยรักษาความเร็วให้คงที่ และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมระบบโดยประมาณแรงบิดที่เข้ามาปรับกวนระบบจากตัวสังเกต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็น

เห็นว่า ตัวชดเชยสามารถประมาณค่าแรงบิดชั่วคราวที่เกิดขึ้นมาได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณไม่ได้มาจากการวัดก็ตาม

จากการนำเสนองานวิจัยต่างๆจะเห็นได้ว่าการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงด้วยตัวสังเกต จะสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ตัวสังเกตยังสามารถร่วมทำงานกับระบบควบคุม โดยระบบจะประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบ และตัวควบคุมจะนำค่าที่ได้จากการสังเกตไปควบคุมระบบให้มีความเสถียร และคงสถานะให้อยู่ในสถานะสมดุล ดังนั้นวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

## 2.6 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะมีประโยชน์ต่อการควบคุมการทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองที่รวดเร็ว และยังทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้นเนื่องจากไม่ต้องใช้ค่าอัตราขยายของระบบที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ Kalman Filter ยังช่วยลดผลกระทบเนื่องจากสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่ทราบค่าตัวแปรของระบบอย่างถูกต้อง ดังนั้น วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### บทที่ 3

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบ

การจำลองระบบให้อยู่ในลักษณะของแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความจำเป็น เพื่อใช้ในการศึกษาวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบ จำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น โดยนำค่าข้อมูลอินพุต และ เอาท์พุตของระบบไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยมีแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ทฤษฎี การหาค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าตัวแปรของระบบอุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งระบบที่ต้องการศึกษาคือระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการทำงานของตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

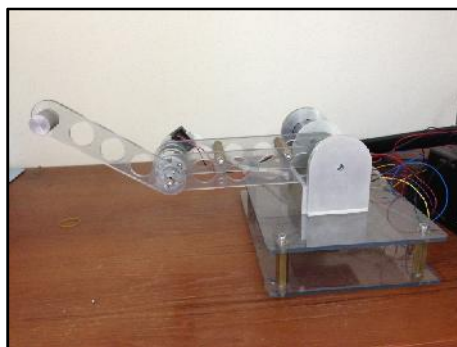
#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดอุปกรณ์ทดลองการประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้นั้น ประกอบด้วย

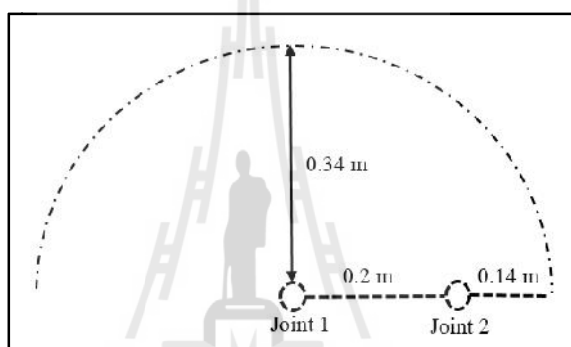
- 1) แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง
- 2) มอเตอร์กระแสตรง
- 3) บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) แอปพลิเคชันสำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ด และ PCI Serial Card

##### 3.1.1 แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง

แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระดังรูปที่ 3.1 เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการทดลองการประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในครั้งนี้ โดยการออกแบบเป็นแบบข้อต่อหมุนทุกแกน ซึ่งในการออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.2 ระยะการเคลื่อนที่ของแขนกลของงานวิจัยนี้

### 3.1.2 มอเตอร์กระแสตรง

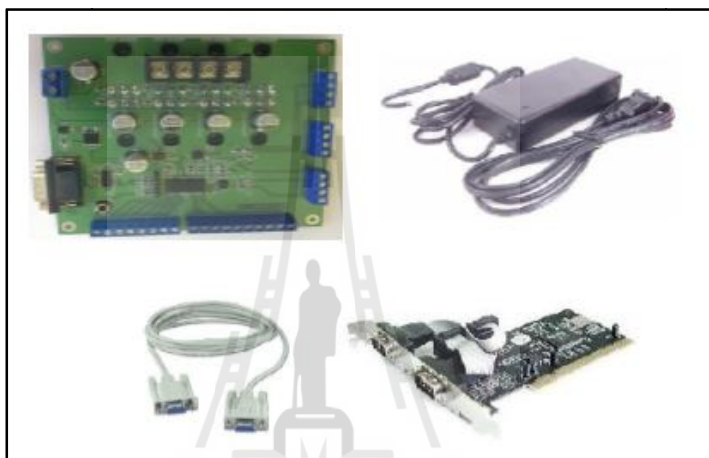
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและดังรูปที่ 3.3 เป็นอุปกรณ์สำคัญในประมาณค่าแรงบิด โหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในครั้งนี้ โดยมอเตอร์กระแสตรงบนข้อต่อหุ่นยนต์ทั้งสองข้อต่อเป็นมอเตอร์เกียร์ 12VDC 100RPM



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.1.3 บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ดและ PCI Serial Card

บอร์ดควบคุมการทำงาน เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ และเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์และมอเตอร์ ซึ่งบอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ดและ PCI Serial Card แสดงดังรูป3.4



รูปที่ 3.4 บอร์ด RAPCON, อแดปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover เข้าสู่ PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์

## 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบ โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับวงจรสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ที่ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ไปด้วย การควบคุมจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมการของแรงบิด

$$I \ddot{S} = -b \cdot \dot{S} + K_t \cdot i_a - T_L \quad (3.1)$$

สมการของวงจรไฟฟ้า

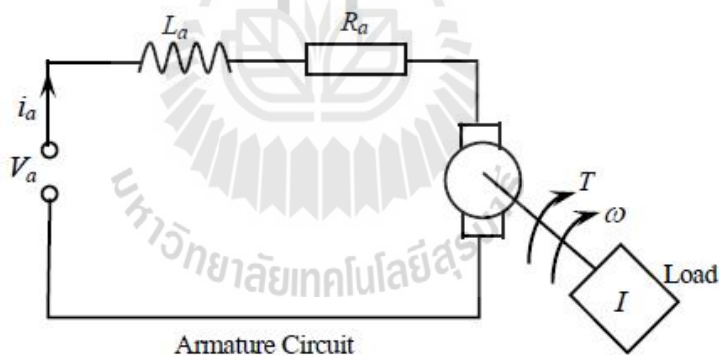
$$V_a - V_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V_b = K_b \cdot \dot{\theta}$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Hl \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $A$  = เมตริกซ์สเตตของระบบ  $[3 \times 3]$   
 $B$  = เมตริกซ์อินพุตของระบบ  $[3 \times 1]$   
 $C$  = เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ  $[1 \times 3]$   
 $H$  = เมตริกซ์ตัวรบกวนของระบบ  $[3 \times 1]$



รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จัดให้อยู่ในรูปแบบ State Space Form จะได้



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = 0 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L$$

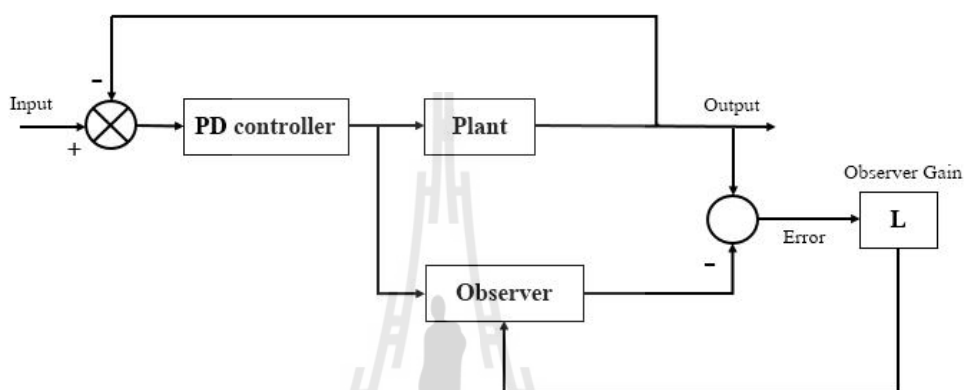
$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$

- เมื่อ  $I$  = โมเมนต์ความเฉื่อย (kg·m<sup>2</sup>)  
 $K_t$  = ค่าคงที่ของแรงบิด (N·m/A)  
 $K_b$  = ค่าคงที่ของ Electromotive Force (V·s/rad)  
 $T_L$  = แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N·m)  
 $b$  = ความหน่วง (N·m·s/rad)  
 $R_a$  = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ( $\Omega$ )  
 $L_a$  = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)  
 $i_a$  = กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)  
 $S$  = ความเร็วรอบ (rad/s)  
 $\theta$  = ขนาดของมุมองศา (Degree)  
 $V_a$  = ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)  
 $V_b$  = ความต่างศักย์ back emf (V)

ในทางปฏิบัติตัวแปรสแตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรสแตตของระบบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการควบคุมระบบจึงต้องมีการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกต ทั้งนี้ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ระบบที่จะสามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตโดยใช้ตัวสังเกตได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุต และเอาต์พุตของระบบได้ หลักการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสแตต และเอาต์พุตจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตที่เป็นอันดับเต็มโดยที่ระบบที่ทำการศึกษามีค่าอินพุต คือ ค่าของความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบ ส่วนตัวแปรสแตตที่พิจารณามีสองตัว คือ ค่า

ของความเร็วรอบ และค่าของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบการทำงานของตัวสังเกตรจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงต้องมีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และชดเชยให้กับตัวสังเกตรเพื่อลดความผิดพลาดจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้

### 3.3 ตัวสังเกตร



รูปที่ 3.6 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตรอันดับเต็ม

จากค่าสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบ State Space Form ได้ค่าเมตริกซ์ต่าง ๆ คือ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix}$$

คุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c = [B \quad AB] \quad (3.5)$$

หากค่า  $\det(P_c) \neq 0$  ระบบจะมีคุณสมบัติในการควบคุมได้  
คุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ พิจารณา

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}$$

หากค่า  $\det(P_o) \neq 0$  ระบบจะมีคุณสมบัติในการสังเกตได้  
การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$$p(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือค่าอัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกต และ  $\omega_n$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของตัว  
สังเกตซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถเลือกตามความเหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้ตัวสังเกตทำงาน  
ได้ผลการตอบสนองตามต้องการ  
การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

$$L = p(A)P_o^{-1}[0 \quad 1]^T \quad (3.8)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e$$

$$\hat{y} = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

$$\text{เมื่อ } e = y - C\hat{x} = '' - \hat{''}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ ‘ $\hat{\cdot}$ ’ คือ ค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ค่า  $e$  คือ ค่าความผิดพลาดของค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกต

### 3.4 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธี

#### Gradient Method

พิจารณาสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในภาวะที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} '' \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} '' \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} '' \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

สมการของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{S} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{S} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e \quad (3.11)$$

$$\hat{y} = [1 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{S} \\ i_a \end{bmatrix}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 3.10 ที่อยู่ในรูป State Space Form ให้มาอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งสองสมการที่มีอินพุต คือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาที่พุทคือค่ามุมของการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di}{dt} + K_b \dot{S} \quad (3.12)$$

$$I \frac{d\dot{S}}{dt} = -b\dot{S} + K_t i_a - T_L \quad (3.13)$$

ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วิธีการที่นำเสนอคือ การใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method และเงื่อนไขในการปรับค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในหลักการการชดเชยจะใช้ค่าของความแตกต่างระหว่างค่ามุมของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่ามุมที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตเมื่อพิจารณาระบบว่ามีอินพุตคือความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาที่พุทคือค่าความเร็วรอบจากสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \dot{S} + a_2 \dot{S} + a_1 \ddot{S} + r_2 \ddot{T}_L + r_1 \dot{T}_L \quad (3.14)$$

$$\text{เมื่อ } b_1 = \frac{K_t}{L_a I}, a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right], a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right], r_1 = \frac{R_a}{L_a I}, r_2 = \frac{1}{I}$$

$$b_1 V_a = \ddot{S} + a_2 \dot{S} + a_1 S + r_2 \dot{T}_L + r_1 T_L \quad (3.15)$$

เมื่อมีการทำการระบุเอกลักษณ์ระบบแล้วค่าของตัวแปรต่างๆในระบบจะคงที่มีเพียงค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพียงตัวแปรเดียวที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณค่าตัวแปรสเตต คือ ค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ( $\hat{T}_L$ ) และค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงแต่จะได้อาจจากการประมาณ แต่ในส่วนของการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะสมมุติว่าสามารถทราบค่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบ พิจารณาสมการของตัวสังเกต

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \ddot{S} + \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right] \dot{S} + \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right] S + \frac{1}{I} \dot{T}_L + \frac{R_a}{L_a I} \hat{T}_L \quad (3.16)$$

$$\text{เมื่อ } b_1 = \frac{K_t}{L_a I}, a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right], a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right], r_1 = \frac{R_a}{L_a I}, r_2 = \frac{1}{I}$$

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \ddot{S} + a_2 \dot{S} + a_1 S + r_2 \dot{\hat{T}}_L + r_1 \hat{T}_L \quad (3.17)$$

ดังนั้นหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือการปรับค่าตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไป ทำได้โดยกำหนดให้ Loss function ( $J$ ) มีค่า

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.18)$$

สมการที่ (3.15) ลบด้วยสมการที่ (3.17) จะได้

$$\ddot{e} = -a_2 \dot{e} - a_1 e - r(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L) - r_1(T_L - \hat{T}_L) \quad (3.19)$$

$$\text{เมื่อ } \ddot{e} = \ddot{S} - \ddot{S}, \dot{e} = \dot{S} - \dot{S}, e = S - S$$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function ( $J$ ) คือ

$$\frac{d\hat{T}_L}{dt} = x \frac{dJ}{d\hat{T}_L} = -x e \frac{de}{d\hat{T}_L} \quad (3.20)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

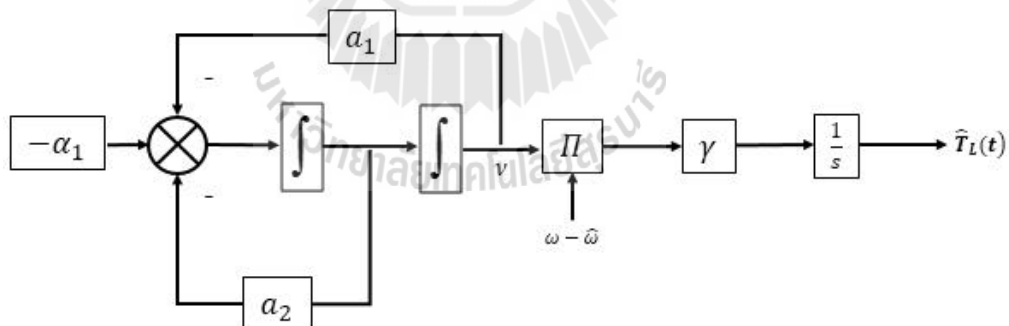
$$\frac{de}{d\hat{T}_L} = -\frac{d\tilde{S}}{d\hat{T}_L} \quad (3.21)$$

โดยที่  $x$  คือ อัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{d\tilde{S}}{d\hat{T}_L} \quad (3.22)$$

เมื่อตัวแปรปรับค่า ( $\hat{T}_L$ ) มีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของสมการ (3.17) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{dv}{dt} + a_1 v = -r_1 \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

## บทที่ 4

### ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ก่อนจะนำไปสร้างเป็นระบบจริงนั้นก็เพื่อประโยชน์ในการสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของระบบ ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานและคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้นได้ เมื่อนำไปทดสอบกับต้นแบบที่สร้างขึ้นจะช่วยลดเวลาในการแก้ไขปัญหาโดยระบบจำลองที่สร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นถ้าการออกแบบระบบและตัวแปรในการจำลองมีความถูกต้องและใกล้เคียงกับระบบจริงจะทำให้การจำลองมีประสิทธิภาพถูกต้องแม่นยำ และมีผลใกล้เคียงกับระบบทดสอบจริง ในบทนี้เป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ การทำงานของมอเตอร์บนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากนั้นจะทำการหาค่าตัวแปรของระบบตัวสังเกต และค่าตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ด้วยวิธี Gradient method ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ การประมาณค่าแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ ในกรณีการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่เริ่มต้น และจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  และในกรณีการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  และจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  โดยพิจารณาผลของการตอบสนองของการเคลื่อนที่ และการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ด้วยการชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับตัวสังเกต

#### 4.1 การประมาณค่าตัวแปรของระบบ

การสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทางคณิตศาสตร์ของระบบ ในการประมาณค่าแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ในครั้งนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ในการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ภายในมอเตอร์ แต่การหาตัวแปรของระบบมอเตอร์ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง จึงใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ (System Identification) ด้วย MATLAB เพื่อหาตัวแปรดังกล่าว การระบุเอกลักษณ์จำเป็นต้องทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 1) สัญญาณป้อนเข้าให้กับระบบ (Input Signal)
- 2) สัญญาณที่ออกจากระบบ (Output Signal)
- 3) รูปแบบจำลองของระบบทางคณิตศาสตร์ (Transfer Function)



การดำเนินการหาค่าตัวแปรของระบบจะเริ่มจาก ป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ แล้วเก็บ ค่าสัญญาณเอาต์พุตของระบบ หลังจากนั้นจะทำการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB โดยรูปแบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ จะต้องระบุอันดับของระบบ และตัวแปรค่าคงที่ ภายในของระบบการปฏิบัติงานเริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตั้งแต่ 5–12 โวลต์ เก็บข้อมูลสัญญาณความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ พิจารณา อินพุต และเอาต์พุต ของระบบมอเตอร์ โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบ State-Space form

สมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$
(4.1)

มอเตอร์กระแสตรงบนข้อต่อที่ 1 จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB ตัวแปรต่างๆจะมีค่าดังนี้คือ

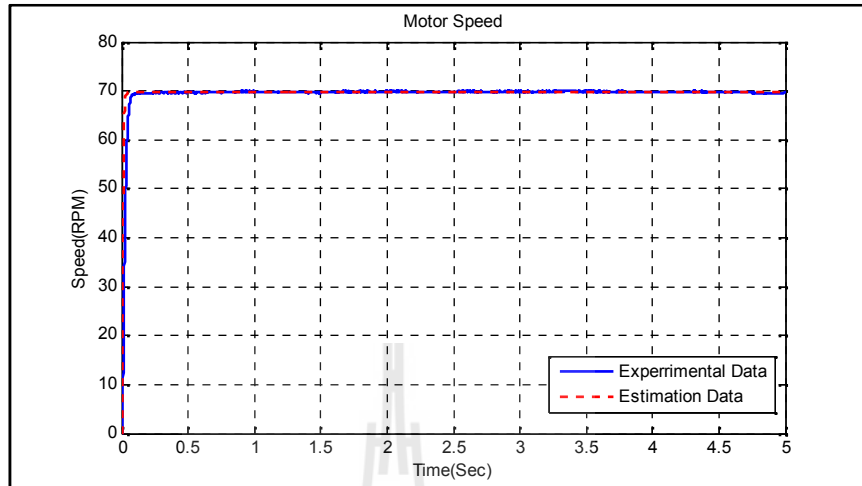
$$I = 3.67 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2, K_t = 1.253 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}, L_a = 9.52 \times 10^{-2} \text{ H}$$

$$b = 0.0412 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{red}, R_a = 4.7 \Omega, K_b = 1.49 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}$$

นำค่าตัวแปรดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 4.1

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$
(4.2)

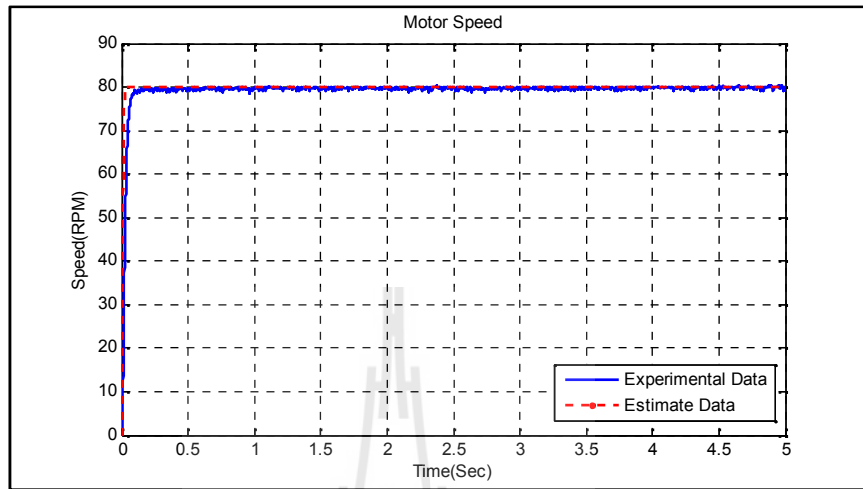


$$I = 3.69 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2, K_t = 1.50 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}, L_a = 9.52 \times 10^{-2} \text{ H}$$

$$b = 0.0423 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{red}, R_a = 4.7 \Omega, K_b = 1.30 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e$$

$$\hat{y} = [1 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบใดๆต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อจะได้ค่าตัวแปรสเตตในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

พิจารณาคุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1

$$P_c = [B \ AB \ A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.59 \times 10^3 \\ 0 & 3.59 \times 10^3 & -2.17 \times 10^5 \\ 10.50 & -518.59 & -3.05 \times 10^5 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_c) = -1.3510 \times 10^8 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1 มีคุณสมบัติในการควบคุมได้  
พิจารณาคุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_o) = 341.4169 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1 มีคุณสมบัติในการสังเกตได้  
การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$p(\cdot) = \cdot^2 + 2' \tilde{S}_n \cdot + \tilde{S}_n'^2$  และ เลือกอีกหนึ่งเทอม จาก 10 เท้าของเทอมจริงที่เลือก

เลือก  $\cdot' = 0.8$  และ  $\tilde{S}_n = 50 \text{ red/sec}$

ได้  $p(A) = A^3 + 480A^2 + 34500A + 1000000I$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix}^3 + 480 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix}^2$$

$$+ 34500 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix} + 1000000 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \times 10^6 & 2.39 \times 10^4 & 1.43 \times 10^5 \\ 0 & -1.51 \times 10^6 & 1.09 \times 10^6 \\ 0 & -4.99 \times 10^4 & -1.63 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $L = p(A)P_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ  $L = \begin{bmatrix} 419.4041 \\ 3187.9916 \\ -4777.0555 \end{bmatrix}$

พิจารณา

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\cdot} \\ \tilde{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\cdot} \\ \tilde{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 419.4041 \\ 3187.9916 \\ -4777.0555 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

พิจารณาคูสมบัติในการควบคุมได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2

$$P_c = [B \quad AB \quad A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4.27 \times 10^3 \\ 0 & 4.27 \times 10^3 & -2.60 \times 10^5 \\ 10.50 & -518.59 & -3.27 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_c) = -1.9152 \times 10^8 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2 มีคุณสมบัติในการควบคุมได้

พิจารณาคูสมบัติความสังเกตได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_o) = 406.5041 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2 มีคุณสมบัติในการสังเกตได้

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$$p(s) = s^2 + 2' \dot{S}_n s + \dot{S}_n^2 \text{ และ เลือกอีกหนึ่งในเทอม จาก 10 เท้าของเทอมจริงที่เลือก}$$

$$\text{เลือก } ' = 0.8 \text{ และ } \dot{S}_n = 50 \text{ rad/sec}$$

$$\text{ได้ } p(A) = A^3 + 480A^2 + 34500A + 1000000I$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix}^3 + 480 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix}^2 \\ &+ 34500 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix} + 1000000 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \times 10^6 & 2.36 \times 10^4 & 1.70 \times 10^5 \\ 0 & -1.6 \times 10^6 & 1.17 \times 10^6 \\ 0 & -3.94 \times 10^4 & -1.71 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $L = p(A)P_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ  $L = \begin{bmatrix} 419.1668 \\ 2883.8089 \\ -4197.7296 \end{bmatrix}$

พิจารณา

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 419.1668 \\ 2883.8089 \\ -4197.7296 \end{bmatrix} y \quad (4.6)$$

### 4.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีเอาต์พุตคือตำแหน่งมุมของการเคลื่อนที่และอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้า พบว่าเป็นระบบอันดับ 1 (type-1) ซึ่งมี ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$G(s) = \frac{K_t}{s[L_a I s^2 + (R_a I + L_a b)s + (R_a b + K_t K_b)]} \quad (4.7)$$

จากระบบอันดับ 1 เมื่อพิจารณาระบบควบคุมวงปิด ที่สภาวะคงตัวนั้น เมื่อให้สัญญาณขั้นบันได ค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบควบคุมแบบพีดี เพื่อปรับปรุงการตอบสนองชั่วคราวให้ดีขึ้น

โดยทั่วไป ตัวควบคุมแบบพีดี สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ดังแสดง

$$G_c(S) = K_p + K_d s \quad (4.8)$$

ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดขึ้นก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น

#### 4.4 ตัวแปรตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ด้วยวิธี Gradient Method

พิจารณาการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง และตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยทดสอบให้แรงบิดคงที่แบบขั้นบันได และให้แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง เข้าไปรบกวนระบบจะสังเกตได้ว่าเมื่อนำความเร็วรอบที่สามารถวัดได้จริงมาเปรียบเทียบกับค่าประมาณค่าความเร็วรอบจากตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบจะส่งผลให้ตัวสังเกตประมาณค่าสถานะผิดพลาด เนื่องจากตัวสังเกตสามารถประมาณค่าภายในระบบได้เท่านั้น จึงจำเป็นต้องสร้างตัวชดเชยในการประมาณค่าแรงบิดภายนอก เพื่อทำงานร่วมกับตัวสังเกตในการประมาณค่าสถานะให้มีประสิทธิภาพ

ค่าตัวแปรการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง เมื่อแรงบิดภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของตัวสังเกตต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1 มีตัวแปรชดเชยแบบปรับค่าได้ ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + a_1 \epsilon = -r_1$$

$$a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a J} + \frac{K_b K_t}{L_a J} \right] = 5.8978 \times 10^3$$

$$a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} \right] = 60.5959$$

$$r_1 = \frac{R_a}{L_a J} = 1.3452 \times 10^4$$



โดยระบบจะมีอัตราการปรับตัว = 0.1546

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2 มีตัวแปรชดเชยแบบปรับค่าได้ ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + a_1 \epsilon = -r_1$$

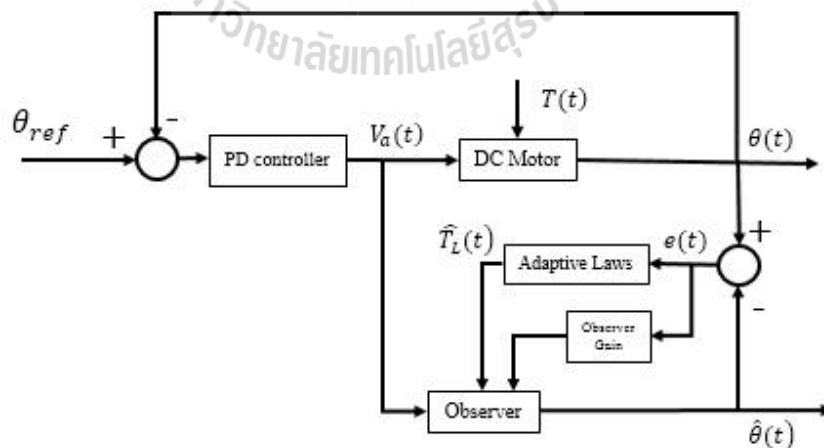
$$a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a J} + \frac{K_b K_t}{L_a J} \right] = 6.1169 \times 10^3$$

$$a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} \right] = 60.8332$$

$$r_1 = \frac{R_a}{L_a J} = 1.3379 \times 10^4$$

โดยระบบจะมีอัตราการปรับตัว = 0.1176

ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ สามารถเขียนแผนภาพการทำงานของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณแรงบิดโหลด ได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณแรงบิดโหลด

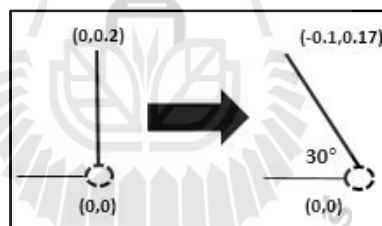
#### 4.5 การจำลองสถานการณ์ประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนแขนกลหุ่นยนต์

การจำลองสถานการณ์ของข้อต่อที่ 1 และข้อต่อที่ 2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณค่าของตัวสังเกต ร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยทำการจำลองสถานการณ์ในการเคลื่อนที่ของข้อต่อ ให้เคลื่อนที่ตามองศาที่กำหนด เริ่มต้นจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  และจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  เพื่อทดสอบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ร่วมกับตัวสังเกตว่าสามารถประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำต่อแขนกลหุ่นยนต์ได้ จากนั้นจึงจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณของตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ ต่อไป

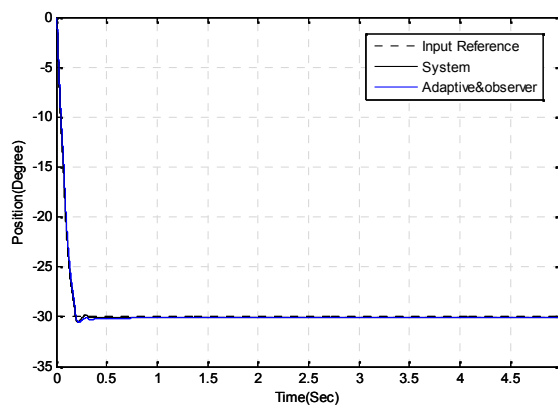
##### ข้อต่อที่ 1

กรณีที่ 1 เมื่อแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $(0,0.2)$  ไปยัง  $(-0.1,0.17)$

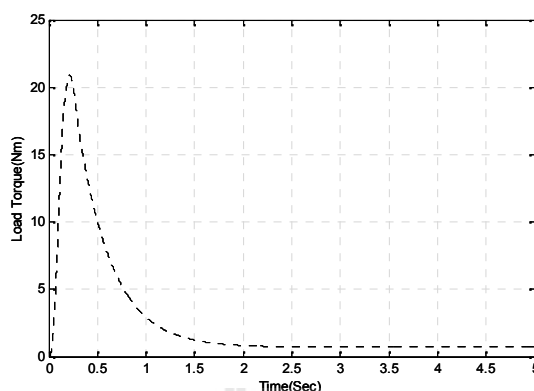
จากรูปที่ 4.4 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$



รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนอง  $\theta(t)$  และ  $\hat{\theta}(t)$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1

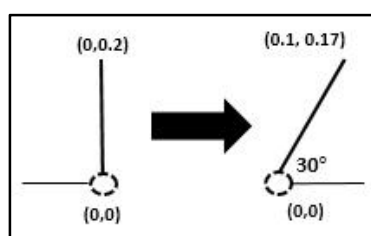


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนอง  $\hat{T}_L$  สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1

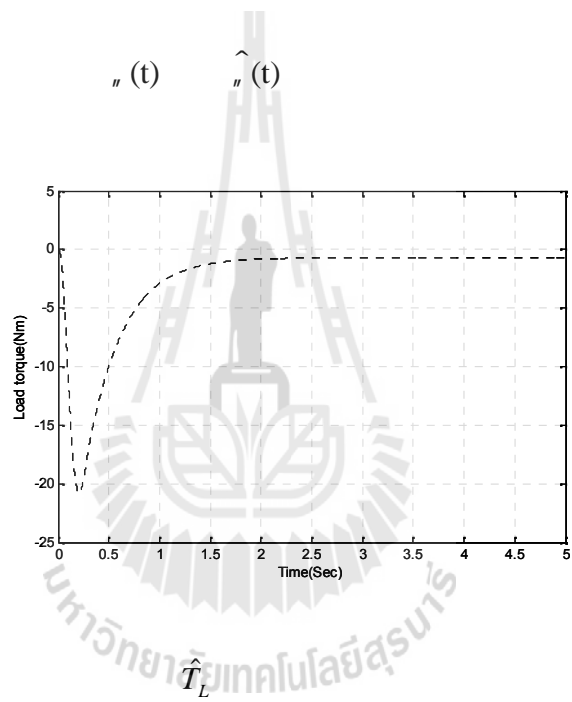
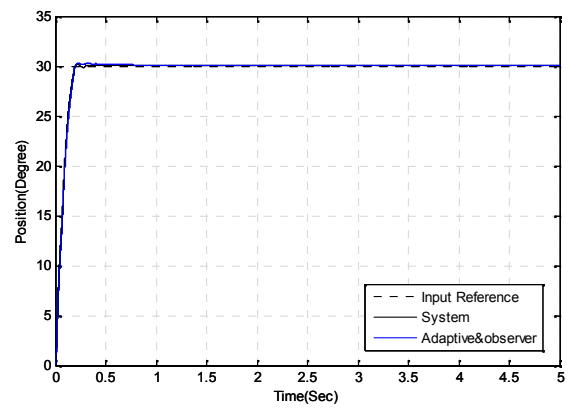
จะเห็นได้ว่า จากรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งระบบของมอเตอร์และการประมาณค่าตำแหน่งตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชย พบว่าตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพกับระบบจริง ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยประมาณแรงบิดเท่ากับ 0.7083 Nm เทียบกับการคำนวณเท่ากับ 0.6326 Nm เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ความผิดพลาดโดยเปรียบเทียบกับการคำนวณเท่ากับ 11.97%

กรณีที่ 2 เมื่อแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (0,0.2) ไปยัง (0.1,0.17)

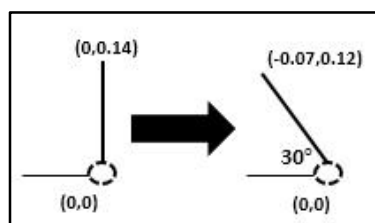
จากรูปที่ 4.7 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  เพื่อจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่เพื่อประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1



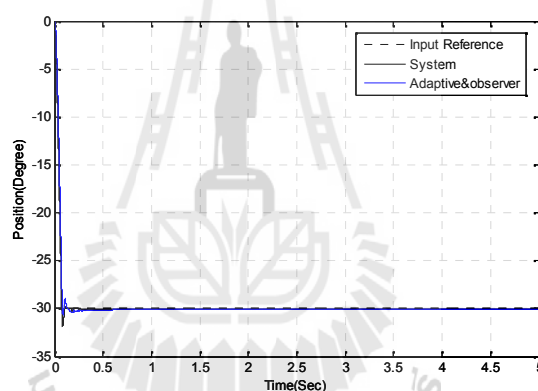
รูปที่ 4.7 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 2



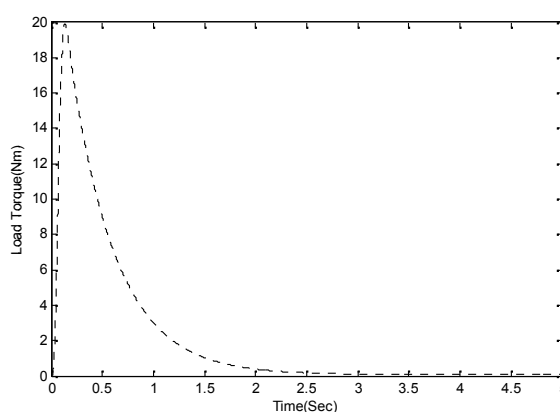
จากรูปที่ 4.10 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  เพื่อจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่เพื่อประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนอง  $\theta(t)$  และ  $\hat{\theta}(t)$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1

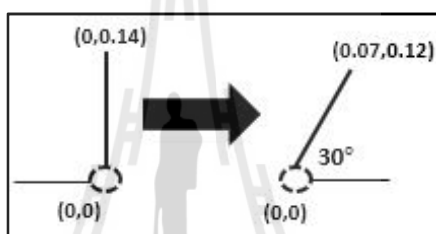


รูปที่ 4.12 ผลตอบสนอง  $\hat{T}_L$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1

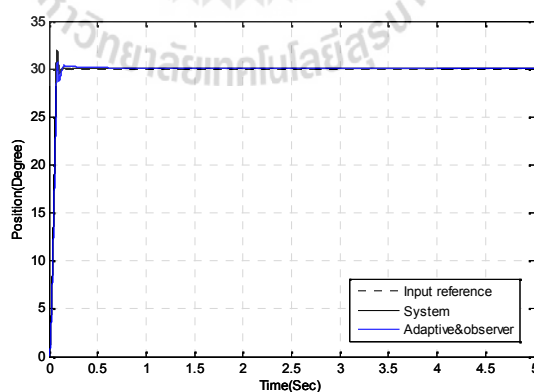
จะเห็นว่า จากรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งระบบของมอเตอร์และการประมาณค่าตำแหน่งตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชย ตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชยสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพกับระบบจริง และจากรูปที่ 4.12 แสดงตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชยประมาณแรงบิดเท่ากับ 0.0712 Nm เทียบกับการคำนวณเท่ากับ 0.0727 Nm เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ความผิดพลาดโดยเปรียบเทียบกับการคำนวณเท่ากับ 2.11%

กรณีที่ 2 เมื่อแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (0,0.14) ไปยัง (0.07,0.12)

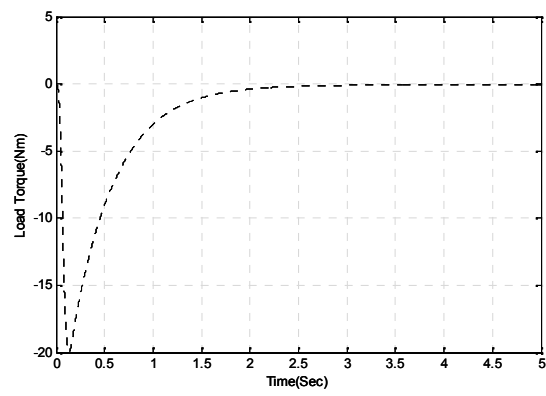
จากรูปที่ 4.13 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกล เมื่อจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่จะเกิดแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อ



รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 2



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนอง  $\theta(t)$  และ  $\hat{\theta}(t)$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 2



## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำได้หลายวิธีการ ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสเตรคของระบบด้วยตัวสังเกต การชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ซึ่งได้จากการประมาณให้กับตัวสังเกตจะ ทำให้ความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสเตรคของระบบโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

หลักการในการออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะประยุกต์จากหลักการของการควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง โดยตั้งสมมุติฐานว่าตัวแปรทุกตัวในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ และมีเพียงค่าของตัวแปรแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้นที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### 2.1 พื้นฐานวิทยาการหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ที่มีในปัจจุบันนี้มีหลากหลายและเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีความต้องการในท้องตลาดมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นความรู้พื้นฐานวิทยาการหุ่นยนต์จึงมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน การแบ่งแยกประเภทของหุ่นยนต์อาจจำแนกกว้าง ๆ ได้ 2 ประเภท คือจำแนกตามเทคโนโลยีการขับเคลื่อนและจำแนกตามรูปร่างและขอบเขตการทำงานสุทธิ ในโครงงานนี้พิจารณาจำแนกตามขอบเขตการทำงานสุทธิ ซึ่งขอบเขตการทำงานสุทธิ หมายถึง ขอบเขตในปริภูมิสามมิติที่ข้อมือของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้นได้ จะเรียกแกนของ 3 ข้อต่อแรกของแขนกลว่า แกนหลัก ซึ่งสามารถพิจารณาดำเนินขอบเขตการทำงานได้จากลำดับชนิดของข้อต่อที่ใช้ใน 3 แกนแรก ข้อต่อมีหลายแบบ แต่ที่เป็นพื้นฐานและนิยมใช้มี 2 แบบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของข้อต่อหุ่นยนต์

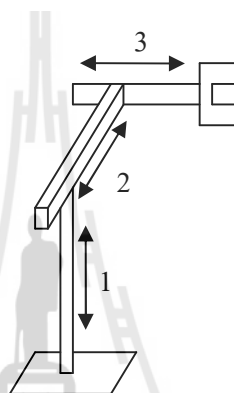
ชนิด	เครื่องหมาย	สัญลักษณ์	การเคลื่อนที่
ข้อต่อหมุน (Revolute)	R		หมุนรอบแกน
ข้อต่อเลื่อน (Prismatic)	P		เชิงเส้นตามแนวแกน



เพื่อสามารถเลือกใช้งานหุ่นยนต์ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องทราบการจำแนกหุ่นยนต์แบบแขนกลตามลักษณะขอบเขตการทำงานดังจะอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

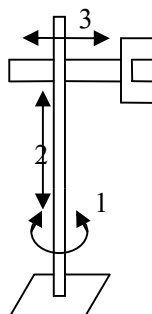
### 2.1.1 การจำแนกหุ่นยนต์แบบแขนกลตามลักษณะขอบเขตการทำงาน

1. หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียนหรือหุ่นยนต์พิกัดฉาก (Cartesian – coordinate robot หรือ Rectangular – coordinate robot) สัญลักษณ์ PPP ดังรูปที่ 2.1 โดยข้อมือจะเลื่อน ขึ้น-ลง, เข้า-ออกและ เดินหน้า-หลังทำให้พื้นที่การทำงานมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมุมฉาก



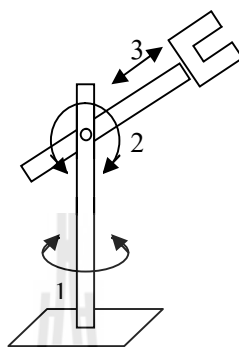
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน

2. หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก (Cylindrical - coordinate robot) สัญลักษณ์ RPP ดังรูปที่ 2.2 สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงข้างบนได้ตามแกนตั้งที่เป็นหลักสามารถเคลื่อนที่เข้าออกตามแนวรัศมี และ แขนหมุนรอบแกนตั้งฉากกับฐานได้ พื้นที่การทำงานจึงเป็นแบบทรงกระบอก



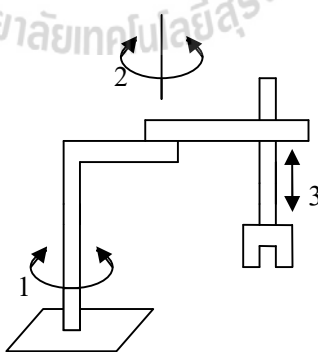
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์พิกัดทรงกระบอก

3. หุ่นยนต์พิกัดทรงกลม (Spherical - coordinate robot) สัญลักษณ์ RRP แสดงดังรูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนจะสามารถยกขึ้นลงได้ในแนวดิ่ง โดยยกทำมุมกับฐานแขนสามารถหมุนได้รอบแกนแนวดิ่งของฐาน พื้นที่การทำงานเป็นแบบทรงกลม



รูปที่ 2.3 หุ่นพิกัดทรงกลม

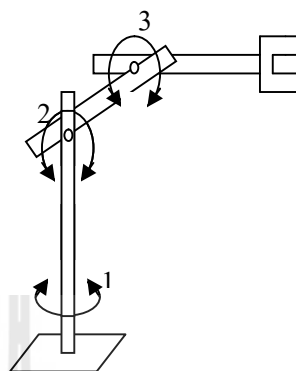
4. หุ่นยนต์สการ์ว (SCARA : Selective Compliance Assembly Robot Arm) ดังรูปที่ 2.4 มีลักษณะคล้ายหุ่นยนต์พิกัดทรงกลม มีสัญลักษณ์ RRP แต่แกนทั้ง 3 จะอยู่ในแนวดิ่งโดยข้อต่อที่ 2 ทำให้แขนหมุนรอบแกนตั้งในแนวนอน เหมือนการหมุนของข้อต่อแรก ภาพตัดขวางในแนวนอนของพื้นที่การทำงานค่อนข้างวงแคบขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของสองแกนแรก



รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์สการ์ว

5. หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน (Articulate - coordinate robot หรือ Revolute robot) ดังรูปที่ 2.5 สัญลักษณ์ RRR ทั้ง 3 ข้อเป็นข้อต่อหมุน หุ่นยนต์แบบนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับแขนมนุษย์มากที่สุด

มีข้อหมุนต่าง ๆ เหมือนกัน ดังนั้นพื้นที่การทำงานจึงสามารถที่จะทำงานได้ในทุกตำแหน่งในระยะความยาวของแขน



รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน

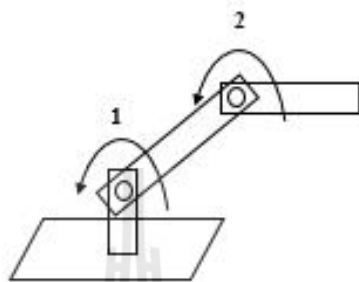
ข้อดี-ข้อเสีย ของหุ่นยนต์แต่ละชนิดนี้แตกต่างกันออกไป เพราะลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันแต่ถ้ามองในแง่ของการทำงานที่เป็นแบบซ้ำ ๆ ที่เดิมตลอด หุ่นยนต์พิกัดคาร์ทีเซียน หรือหุ่นยนต์พิกัดฉาก จะสามารถทำงานได้ดีกว่า คือสามารถเคลื่อนที่ไปหาเป้าหมายโดยมีความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่ถ้ามองในแง่การเข้าถึงวัตถุชนิดพิกัดทรงกลม และข้อต่อหมุน หมุน จะสามารถเข้าถึงวัตถุได้มากกว่า

จากการจำแนกหุ่นยนต์ดังอธิบายข้างต้นสามารถสรุปการทำงานของแขนกลทั้ง 5 แบบได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ที่ขึ้นอยู่กับแกนหลัก

ประเภทแขนกล	แกน 1	แกน 2	แกน 3	จำนวนข้อต่อหมุน
พิกัดคาร์ทีเซียน	P	P	P	0
พิกัดทรงกระบอก	R	P	P	1
พิกัดทรงกลม	R	R	P	2
สกร่า	R	R	P	2
ข้อต่อหมุน	R	R	R	3

เมื่อพิจารณาลักษณะของการทำงานของหุ่นยนต์และการจำแนกหุ่นยนต์ พื้นฐานทั้ง 5 ประเภทข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกพัฒนาหุ่นยนต์ข้อต่อหมุนซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแขนมนุษย์มากที่สุด ซึ่งเป็นข้อหมุนทั้งหมดเหมือนกัน และพื้นที่ในการทำงานสามารถจะทำงานได้ในทุกตำแหน่งในระยะความยาวของแขน ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หุ่นยนต์ข้อต่อหมุนสององศาอิสระ สัญลักษณ์ RR ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ข้อต่อหมุน 2 องศาอิสระ

โดยหุ่นยนต์ข้อต่อหมุนสององศาอิสระมีรูปแบบคล้ายแขนคน โดยประกอบด้วย ข้อต่อที่ 1 คือ ท่อนแขนด้านบน ข้อต่อที่ 2 คือ ท่อนแขนด้านล่าง

### 2.1.2 ลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์

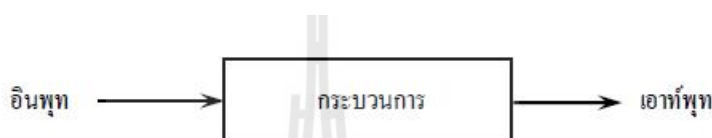
นอกจากเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการแบ่งประเภทของหุ่นดังที่กล่าวมาแล้ว คุณสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญในการเลือกใช้หุ่นยนต์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของหุ่นยนต์

คุณลักษณะ (Characteristics)	หน่วย (Unit)
จำนวนแกน	-
ความสามารถในการยกน้ำหนัก	Kg
ความเร็วสูงสุด	mm / sec
ระยะเอื้อมถึงและสโตรก	Mm
การหมุนของเครื่องมือ	Deg
การซ้ำตำแหน่งเดิม	Mm
ความละเอียดและความแม่นยำ	Mm

## 2.2 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามที่เราต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตหรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (Process) ที่เราต้องการที่จะควบคุมสามารถแทนที่ได้ด้วยบล็อก (Block) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบมักแทนด้วยสัญญาณโดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต



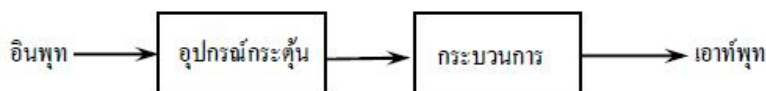
รูปที่ 2.7 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop Control System)
2. ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

### 2.2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด

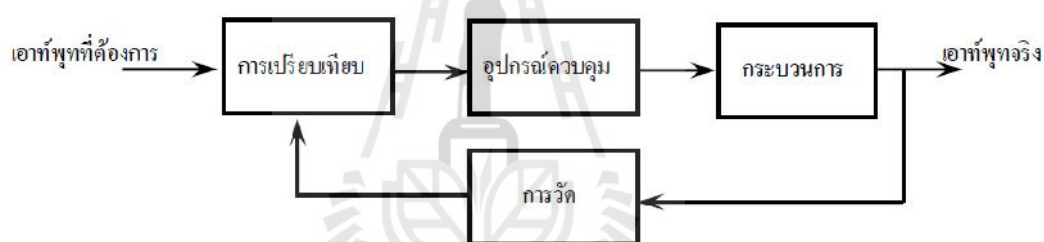
เป็นการใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองที่เราต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบเปิด

### 2.2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

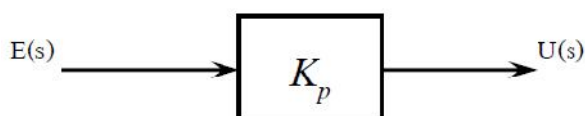
ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการป้อนกลับมาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาต์พุตได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อเราทราบค่าเอาต์พุตแล้วเรามักจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงจะถูกส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราจะได้ว่าค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

#### 2.2.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control, P-control)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม ( $u$ ) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด ( $e$ ) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ต้องการควบคุม แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบสัดส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

$$u(t) = K_p e(t)$$

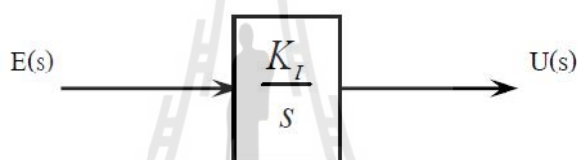
เมื่อ  $K_p$  จะเป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่าเกนสัดส่วน

ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller) คือลดค่าความผิดพลาดของระบบ โดย สามารถตอบสนองกับค่าสัญญาณความผิดพลาดอย่างทันทีทันใด

### 2.2.2.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีรูปแบบสมการ คือ  $u(t) = K_I \int e(t) dt$  เมื่อ  $K_I$  คือค่าคงที่ของตัวควบคุม แบบอินทิกรัล แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลแสดงดังรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

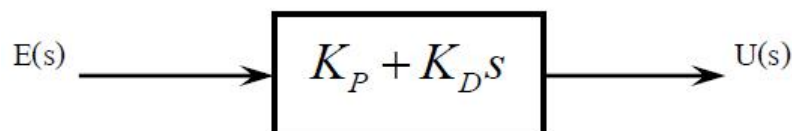
จากรูปแบบการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม  $u(t)$  จะมีค่ามากโดยที่สัญญาณความ ผิดพลาด  $e(t)$  มีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณการควบคุมในกรณีของ การควบคุมแบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (past value) ไม่เหมือนกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน

ประโยชน์ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ใน ขณะเดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วยการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะ เป็นการเพิ่มอันดับ ให้กับระบบของเรา เช่น ในกรณีระบบเป็นอันดับที่หนึ่ง และเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Controller) แล้วระบบป้อนกลับจะมีอันดับเป็นสอง

### 2.2.2.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์ มีรูปแบบสมการ คือ  $u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}$  เมื่อ  $K_D$  คือค่าคงที่ของตัวควบคุม แบบอนุพันธ์ ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัว

ควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งเรียกว่าตัว ควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์หรือ (PD-controller) ดังแสดงในรูปที่ 1.12 ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลก็จะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอินทิกรัลหรือ (PI-controller) และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เรียกว่า (PID-controller)



รูปที่ 2.12 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นคือ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณความผิดพลาดนี้มีสัญญาณ ราบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (fluctuate) ก่อนข้างมาก (เนื่องจากค่าความชัน (slope) ของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแปลงก่อนข้างมาก) ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

### 2.3 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต (State-Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสแตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสแตตหรือสัญญาณสแตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้ แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต (State Estimator) หรือ ตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่จะทำการควบคุมวิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce-Order Observer) เมื่อต้องการ



ทราบค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสแตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยใช้ค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้บางสแตตเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

### 2.3.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-order observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมดโดยใช้ข้อมูลของเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสแตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสแตตของตัวเองได้ แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open-Loop Observer)

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเขียนในรูป State Space Form ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}A &= \text{เมตริกซ์สแตตของระบบ } [n \times n] \\ B &= \text{เมตริกซ์อินพุตของระบบ } [n \times 1] \\ C &= \text{เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ } [1 \times n] \\ x &= \text{สแตตเวกเตอร์ของระบบ } [n \times 1] \\ u &= \text{อินพุตของระบบ } [1 \times 1] \\ y &= \text{เอาต์พุตของระบบ } [1 \times 1]\end{aligned}$$

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\tag{2.2}$$

เมื่อ  $L =$  เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

$\hat{x} =$  ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.5)$$

เมื่อ  $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ  $x - \hat{x} \rightarrow 0$  จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสถานะซึ่งวัดได้จากระบบจริง และตัวสังเกตหมดไปผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสถานะในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบจะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้

$$\text{Observability matrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ระบบใดๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ  $n$  ( $\text{Rank} [ ] = n$ ) เมื่อ  $n$  คือ อันดับของระบบหรือของเมตริกซ์  $A$

สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต(Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

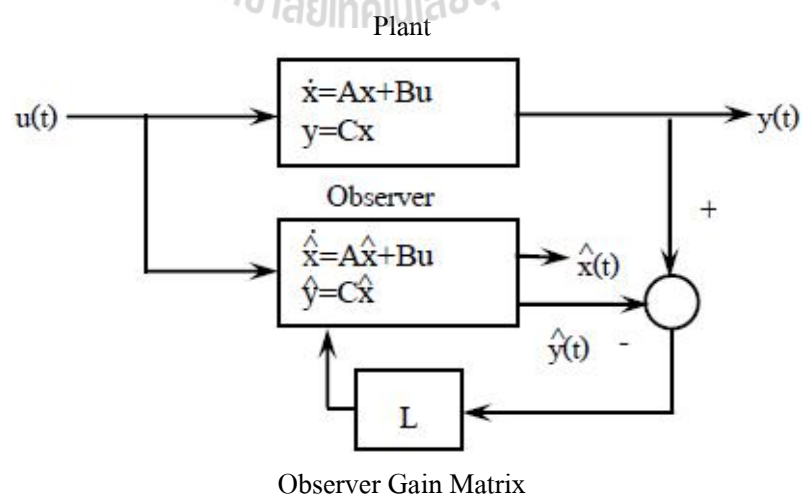
$$L = w(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$q(s) = s^n + r_1 s^{n-1} + \dots + r_{n-1} s + r_n \quad (2.8)$$

$$q(A) = A^n + r_1 A^{n-1} + \dots + r_{n-1} A + r_n \quad (2.9)$$

หลักการทำงานของตัวสังเกตคือจะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบ ค่าตัวแปรสถานะภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกต และตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสถานะที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกต เพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้างของตัวสังเกต



รูปที่ 2.13 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

เมื่อ  $L$  = ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

$u(t)$  = ค่าอินพุทของระบบ  $[1 \times 1]$

$y(t)$  = ค่าเอาต์พุทของระบบ  $[1 \times 1]$

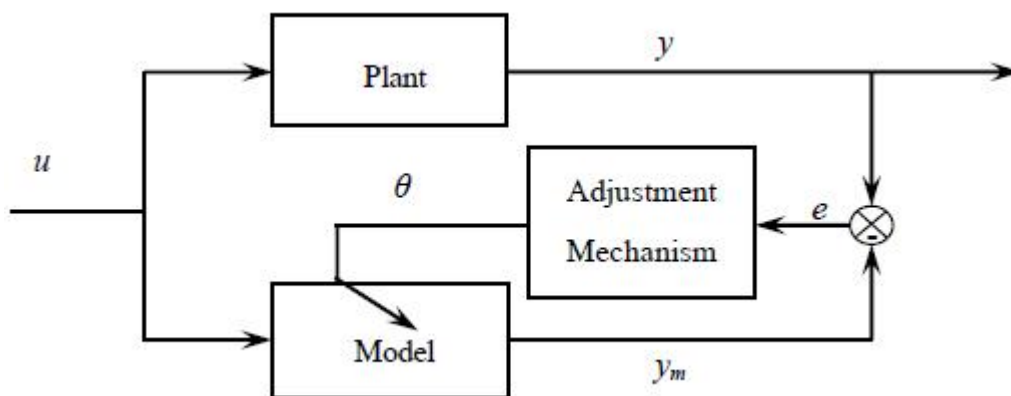
$\hat{y}(t)$  = ค่าเอาต์พุทของตัวสังเกต  $[1 \times 1]$

$\hat{x}(t)$  = ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต  $[n \times 1]$

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกตซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือการกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือสัญญาณประมาณ  $\hat{x}(t)$  จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสแตตจิกหรือ  $x(t)$  ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่ารูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form) ได้ จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

## 2.4 การควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) โดยใช้วิธีการ Gradient Method

การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักในการทำงานคือจะปรับค่าตัวแปรต่างๆภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาต์พุทของแบบจำลอง (Model) และระบบที่ต้องการ (Plant) หดไป จากรูปที่ 2.14 ให้เอาต์พุทของแบบจำลองเป็น  $y_m$  เอาต์พุทของระบบเป็น  $y$  และ  $e$  เป็นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุททั้งสอง (error) และมีตัวแปรที่ทำการปรับค่า คือ  $\theta$



รูปที่ 2.14 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การปรับค่าตัวแปร ( $\theta$ ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหมดไป โดยกำหนดให้ Loss function ( $J$ ) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.10)$$

การปรับค่าของของตัวแปร ( $\theta$ ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.11)$$

$$e = y - y_m \quad (2.12)$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \quad (2.13)$$

โดยที่  $-\gamma$  คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎีของ Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function ( $J$ ) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบ และแบบจำลองหมดไปโดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการ

ปรับตัวซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

## 2.5 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานได้ตามต้องการ ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะงาน และความเหมาะสม ตัวควบคุมที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมบางประเภทต้องการค่าของตัวแปรสแตตเพื่อที่จะทำการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง และการที่ต้องการค่าของตัวแปรสแตตเป็นที่มาของการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่าเนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีราคาแพง และลดความซับซ้อนในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ในภาวะการทำงานจริงมักมีแรงบิดจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอเข้ามารบกวนระบบ ซึ่งแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้การประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาด และลดประสิทธิภาพในการทำงานของตัวควบคุมลง จากแนวคิดในการที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนระบบ ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งใช้หลักการของการควบคุมปรับตัว

Jong Sun Ko (1995) และคณะ ได้นำเสนอ การควบคุมตำแหน่งของ Brushless DC Motor โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ด้วยทฤษฎีของ Lyapunov ร่วมกับตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยการควบคุมกระแสแบบ Feed Forward Compensator เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ เนื่องจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ ผลที่ได้คือ ตัวสังเกตสามารถปรับตัว และอ้างอิงตามสัญญาณจริงได้ นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์เป็นไปตามตำแหน่งที่ต้องการค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

Kichul Hong and Kwanghee Nam (1998) ได้นำเสนอการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและแรงบิดที่เข้ามารบกวนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานระบบควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor) ในสถานะที่มีแรงบิดเข้ามารบกวนแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา และประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากเวลาประวิง (Time Delay) ผลที่ได้คือการตอบสนองของความเร็วรอบมีความรวดเร็วมากขึ้นและลดการแกว่งตัวของตอบสนองในสถานะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนกับระบบรวมทั้งสามารถลดผลกระทบจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบที่เกิดจาก Bandwidth ของระบบที่มีค่ามากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Gheorghe Daniel (2003) และคณะได้นำเสนอ การควบคุมการควบคุมมอเตอร์ให้มอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่มอเตอร์ที่ใช้จะมีเซนเซอร์วัดตำแหน่งและให้เคลื่อนที่แบบจลน์ โดยมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้าไปปรับกวนระบบ เนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อย ระบบจะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและจะประมาณค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่เกิดจากโมเมนต์ความเฉื่อย ผลที่แสดงตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่และมีเสถียรภาพในขณะที่มีแรงบิดแบบชั่วคราวเข้ามาปรับกวนระบบและมอเตอร์มีการเคลื่อนที่แบบจลน์

Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005) ได้นำเสนองานวิจัย เรื่องการควบคุมแรงบิดของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดแบบง่ายและตัวควบคุมแรงบิดแบบมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของ Lyapunov Technique (integral action) เพื่อการันตีเสถียรภาพของระบบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นการออกแบบที่ประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองของวิธีการ Lyapunov สำหรับระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ถึงแม้จะมีความไม่แน่นอนหรือความปั่นป่วนของพารามิเตอร์ ผลการจำลองก็ยังยืนยันประสิทธิภาพของการควบคุมที่มีประสิทธิภาพของระบบ

Srisertpol, J., and Khajomtraidet, C. (2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง จากผลการจำลองระบบและการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการชดเชยแบบปรับตัวได้สองวิธีการ คือ Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method จากผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีการสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Chin Chih Ou and Tien Chi Chen (2012) ได้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ของรถเข็นผู้ป่วยให้เคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ เพื่อลดการใช้กำลังแขนที่มากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือปวดหัวไหล่จากการใช้กำลังแขนเพื่อให้รถเคลื่อนที่ในกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาปรับกวนระบบ ซึ่งจะส่งผลในการเคลื่อนที่ของรถเข็น เพื่อทำการคำนวณแรงที่ต้องเพิ่มเข้าไปให้กับรถเข็นให้รถเข็นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยรักษาความเร็วให้คงที่ และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมระบบโดยประมาณแรงบิดที่เข้ามาปรับกวนระบบจากตัวสังเกต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็น

เห็นว่า ตัวชดเชยสามารถประมาณค่าแรงบิดชั่วคราวที่เกิดขึ้นมาได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณไม่ได้มาจากการวัดก็ตาม

จากการนำเสนองานวิจัยต่างๆจะเห็นได้ว่าการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงด้วยตัวสังเกต จะสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ตัวสังเกตยังสามารถร่วมทำงานกับระบบควบคุม โดยระบบจะประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบ และตัวควบคุมจะนำค่าที่ได้จากการสังเกตไปควบคุมระบบให้มีความเสถียร และคงสถานะให้อยู่ในสถานะสมดุล ดังนั้นวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

## 2.6 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะมีประโยชน์ต่อการควบคุมการทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองที่รวดเร็ว และยังทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้นเนื่องจากไม่ต้องใช้ค่าอัตราขยายของระบบที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ Kalman Filter ยังช่วยลดผลกระทบเนื่องจากสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่ทราบค่าตัวแปรของระบบอย่างถูกต้อง ดังนั้น วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้การชดเชยแบบปรับตัวได้จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



### บทที่ 3

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบ

การจำลองระบบให้อยู่ในลักษณะของแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความจำเป็น เพื่อใช้ในการศึกษาวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบ จำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น โดยนำค่าข้อมูลอินพุต และ เอาท์พุตของระบบไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยมีแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ทฤษฎี การหาค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าตัวแปรของระบบอุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งระบบที่ต้องการศึกษาคือระบบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการทำงานของตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

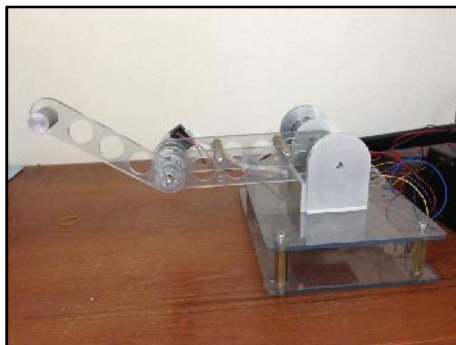
#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดอุปกรณ์ทดลองการประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้นั้น ประกอบด้วย

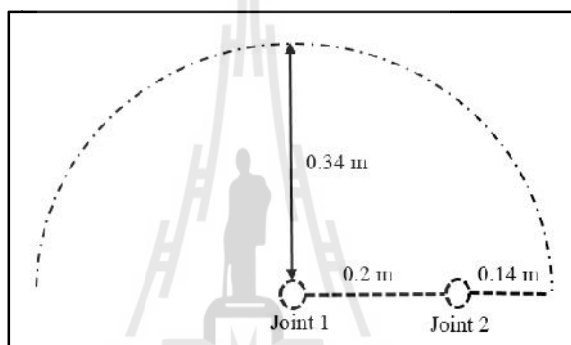
- 1) แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง
- 2) มอเตอร์กระแสตรง
- 3) บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) แอปพลิเคชันสำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ด และ PCI Serial Card

##### 3.1.1 แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง

แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระดังรูปที่ 3.1 เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการทดลองการประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในครั้งนี้ โดยการออกแบบเป็นแบบข้อต่อหมุนทุกแกน ซึ่งในการออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระสำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.2 ระยะการเคลื่อนที่ของแขนกลของงานวิจัยนี้

### 3.1.2 มอเตอร์กระแสตรง

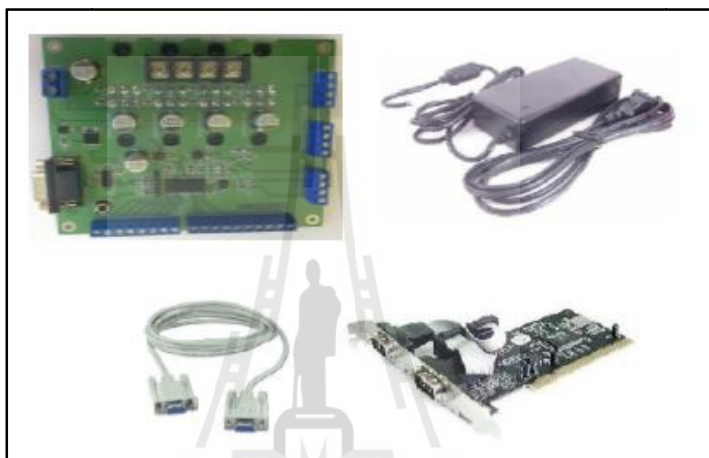
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและดังรูปที่ 3.3 เป็นอุปกรณ์สำคัญในประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในครั้งนี้ โดยมอเตอร์กระแสตรงบนข้อต่อหุ่นยนต์ทั้งสองข้อต่อเป็นมอเตอร์เกียร์ 12VDC 100RPM



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.1.3 บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ดและ PCI Serial Card

บอร์ดควบคุมการทำงาน เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ และเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์และมอเตอร์ ซึ่งบอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ดและ PCI Serial Card แสดงดังรูป3.4



รูปที่ 3.4 บอร์ด RAPCON, อแดปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover เข้าสู่ PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์

## 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบ โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับวงจรสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ที่ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์มีค่าคงที่ไปด้วย การควบคุมจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมการของแรงบิด

$$I \ddot{\theta} = -b \cdot \dot{\theta} + K_t \cdot i_a - T_L \quad (3.1)$$

สมการของวงจรไฟฟ้า

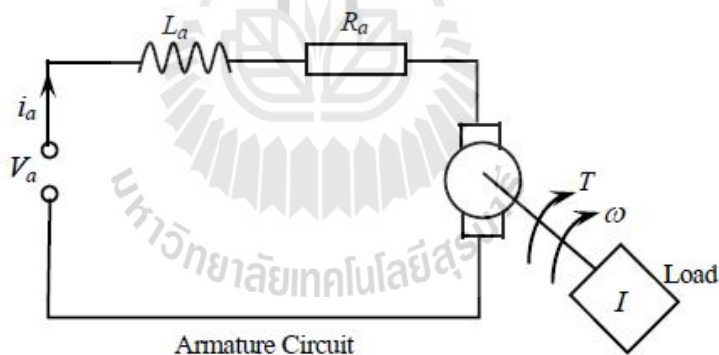
$$V_a - V_b = L_a \frac{di}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (3.2)$$

เมื่อ  $V_b = K_b \cdot \dot{\theta}$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Hl \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $A$  = เมตริกซ์สเตตของระบบ  $[3 \times 3]$   
 $B$  = เมตริกซ์อินพุตของระบบ  $[3 \times 1]$   
 $C$  = เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ  $[1 \times 3]$   
 $H$  = เมตริกซ์ตัวรบกวนของระบบ  $[3 \times 1]$



รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จัดให้อยู่ในรูปแบบ State Space Form จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = 0 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L$$

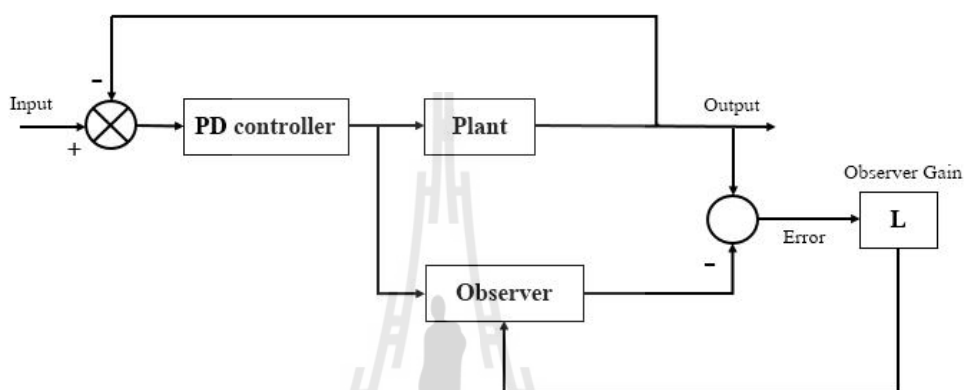
$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$

- เมื่อ  $I$  = โมเมนต์ความเฉื่อย (kg·m<sup>2</sup>)  
 $K_t$  = ค่าคงที่ของแรงบิด (N·m/A)  
 $K_b$  = ค่าคงที่ของ Electromotive Force (V·s/rad)  
 $T_L$  = แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N·m)  
 $b$  = ความหน่วง (N·m·s/rad)  
 $R_a$  = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ( $\Omega$ )  
 $L_a$  = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)  
 $i_a$  = กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)  
 $S$  = ความเร็วรอบ (rad/s)  
 $\theta$  = ขนาดของมุมองศา (Degree)  
 $V_a$  = ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)  
 $V_b$  = ความต่างศักย์ back emf (V)

ในทางปฏิบัติตัวแปรสแตตของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรสแตตของระบบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการควบคุมระบบจึงต้องมีการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกต ทั้งนี้ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ระบบที่จะสามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตโดยใช้ตัวสังเกตได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุต และเอาต์พุตของระบบได้ หลักการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสแตต และเอาต์พุตจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตที่เป็นอันดับเต็มโดยที่ระบบที่ทำการศึกษามีค่าอินพุต คือ ค่าของความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาต์พุต คือ ความเร็วรอบ ส่วนตัวแปรสแตตที่พิจารณามีสองตัว คือ ค่า

ของความเร็วรอบ และค่าของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบการทำงานของตัวสังเกตรจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงต้องมีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และชดเชยให้กับตัวสังเกตรเพื่อลดความผิดพลาดจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้

### 3.3 ตัวสังเกตร



รูปที่ 3.6 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตรอันดับเต็ม

จากค่าสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบ State Space Form ได้ค่าเมตริกซ์ต่าง ๆ คือ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix}$$

คุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบ

$$P_c = [B \quad AB] \quad (3.5)$$

หากค่า  $\det(P_c) \neq 0$  ระบบจะมีคุณสมบัติในการควบคุมได้  
คุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ พิจารณา

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}$$

หากค่า  $\det(P_o) \neq 0$  ระบบจะมีคุณสมบัติในการสังเกตได้  
การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$$p(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือค่าอัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกต และ  $\omega_n$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของตัว  
สังเกตซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถเลือกตามความเหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้ตัวสังเกตทำงาน  
ได้ผลการตอบสนองตามต้องการ  
การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

$$L = p(A)P_o^{-1}[0 \quad 1]^T \quad (3.8)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e$$

$$\hat{y} = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

$$\text{เมื่อ } e = y - C\hat{x} = '' - \hat{''}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ ‘ $\hat{\cdot}$ ’ คือ ค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ค่า  $e$  คือ ค่าความผิดพลาดของค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และตัวสังเกต

### 3.4 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธี

#### Gradient Method

พิจารณาสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในภาวะที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} '' \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} '' \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} '' \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$



สมการของตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{S} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{S} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e \quad (3.11)$$

$$\hat{y} = [1 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{S} \\ i_a \end{bmatrix}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 3.10 ที่อยู่ในรูป State Space Form ให้มาอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งสองสมการที่มีอินพุต คือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาท์พุตคือค่ามุมของการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b \hat{S} \quad (3.12)$$

$$I \frac{d\hat{S}}{dt} = -b\hat{S} + K_t i_a - T_L \quad (3.13)$$

ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วิธีการที่นำเสนอคือ การใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method และเงื่อนไขในการปรับค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในหลักการการชดเชยจะใช้ค่าของความแตกต่างระหว่างค่ามุมของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่ามุมที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตเมื่อพิจารณาระบบว่ามีอินพุตคือความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาท์พุตคือค่าความเร็วรอบจากสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \hat{S} + a_2 \hat{S} + a_1 \dot{\hat{S}} + r_2 \dot{T}_L + r_1 T_L \quad (3.14)$$

$$\text{เมื่อ } b_1 = \frac{K_t}{L_a I}, a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right], a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right], r_1 = \frac{R_a}{L_a I}, r_2 = \frac{1}{I}$$

$$b_1 V_a = \ddot{S} + a_2 \dot{S} + a_1 S + r_2 \dot{T}_L + r_1 T_L \quad (3.15)$$

เมื่อมีการทำการระบุเอกลักษณ์ระบบแล้วค่าของตัวแปรต่างๆในระบบจะคงที่มีเพียงค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพียงตัวแปรเดียวที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณค่าตัวแปรสเตตคือ ค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ( $\hat{T}_L$ ) และค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงแต่จะได้อาจจากการประมาณ แต่ในส่วนของการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะสมมุติว่าสามารถทราบค่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบ พิจารณาสมการของตัวสังเกต

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \ddot{S} + \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right] \dot{S} + \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right] S + \frac{1}{I} \dot{T}_L + \frac{R_a}{L_a I} \hat{T}_L \quad (3.16)$$

$$\text{เมื่อ } b_1 = \frac{K_t}{L_a I}, a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right], a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right], r_1 = \frac{R_a}{L_a I}, r_2 = \frac{1}{I}$$

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \ddot{S} + a_2 \dot{S} + a_1 S + r_2 \dot{\hat{T}}_L + r_1 \hat{T}_L \quad (3.17)$$

ดังนั้นหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือการปรับค่าตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไป ทำได้โดยกำหนดให้ Loss function ( $J$ ) มีค่า

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.18)$$

สมการที่ (3.15) ลบด้วยสมการที่ (3.17) จะได้

$$\ddot{e} = -a_2 \dot{e} - a_1 e - r(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L) - r_1(T_L - \hat{T}_L) \quad (3.19)$$

$$\text{เมื่อ } \ddot{e} = \ddot{S} - \ddot{S}, \dot{e} = \dot{S} - \dot{S}, e = S - S$$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function ( $J$ ) คือ

$$\frac{d\hat{T}_L}{dt} = x \frac{dJ}{d\hat{T}_L} = -x e \frac{de}{d\hat{T}_L} \quad (3.20)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

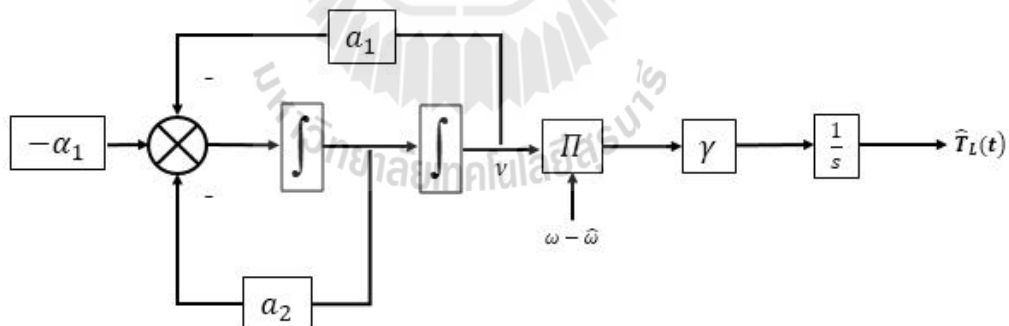
$$\frac{de}{d\hat{T}_L} = -\frac{d\tilde{S}}{d\hat{T}_L} \quad (3.21)$$

โดยที่  $x$  คือ อัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{d\tilde{S}}{d\hat{T}_L} \quad (3.22)$$

เมื่อตัวแปรปรับค่า ( $\hat{T}_L$ ) มีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของสมการ (3.17) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{dv}{dt} + a_1 v = -r_1 \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

## บทที่ 4

### ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ก่อนจะนำไปสร้างเป็นระบบจริงนั้นก็เพื่อประโยชน์ในการสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของระบบ ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานและคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้นได้ เมื่อนำไปทดสอบกับต้นแบบที่สร้างขึ้นจะช่วยลดเวลาในการแก้ไขปัญหาโดยระบบจำลองที่สร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นถ้าการออกแบบระบบและตัวแปรในการจำลองมีความถูกต้องและใกล้เคียงกับระบบจริงจะทำให้การจำลองมีประสิทธิภาพถูกต้องแม่นยำ และมีผลใกล้เคียงกับระบบทดสอบจริง ในบทนี้เป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ การทำงานของมอเตอร์บนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากนั้นจะทำการหาค่าตัวแปรของระบบตัวสังเกต และค่าตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ด้วยวิธี Gradient method ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ การประมาณค่าแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ ในกรณีการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่เริ่มต้น และจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  และในกรณีการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  และจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  โดยพิจารณาผลของการตอบสนองของการเคลื่อนที่ และการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ด้วยการชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับตัวสังเกต

#### 4.1 การประมาณค่าตัวแปรของระบบ

การสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทางคณิตศาสตร์ของระบบ ในการประมาณค่าแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ในครั้งนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ในการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ภายในมอเตอร์ แต่การหาตัวแปรของระบบมอเตอร์ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง จึงใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ (System Identification) ด้วย MATLAB เพื่อหาตัวแปรดังกล่าว การระบุเอกลักษณ์จำเป็นต้องทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 1) สัญญาณป้อนเข้าให้กับระบบ (Input Signal)
- 2) สัญญาณที่ออกจากระบบ (Output Signal)
- 3) รูปแบบจำลองของระบบทางคณิตศาสตร์ (Transfer Function)

การดำเนินการหาค่าตัวแปรของระบบจะเริ่มจาก ป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ แล้วเก็บ ค่าสัญญาณเอาต์พุตของระบบ หลังจากนั้นจะทำการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB โดยรูปแบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ จะต้องระบุอันดับของระบบ และตัวแปรค่าคงที่ ภายในของระบบการปฏิบัติงานเริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตั้งแต่ 5–12 โวลต์ เก็บข้อมูลสัญญาณความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ พิจารณา อินพุต และเอาต์พุต ของระบบมอเตอร์ โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบ State-Space form

สมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$
(4.1)

มอเตอร์กระแสตรงบนข้อต่อที่ 1 จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB ตัวแปรต่างๆจะมีค่าดังนี้คือ

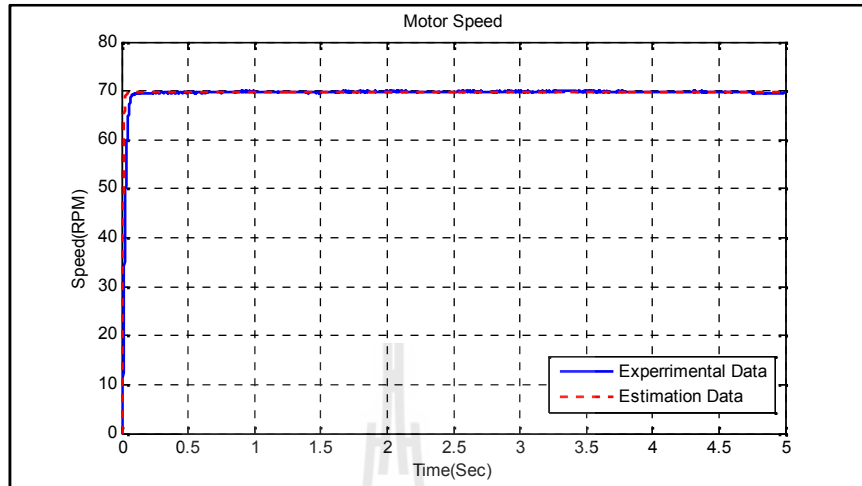
$$I = 3.67 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2, K_t = 1.253 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}, L_a = 9.52 \times 10^{-2} \text{ H}$$

$$b = 0.0412 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{red}, R_a = 4.7 \Omega, K_b = 1.49 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}$$

นำค่าตัวแปรดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 4.1

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$
(4.2)

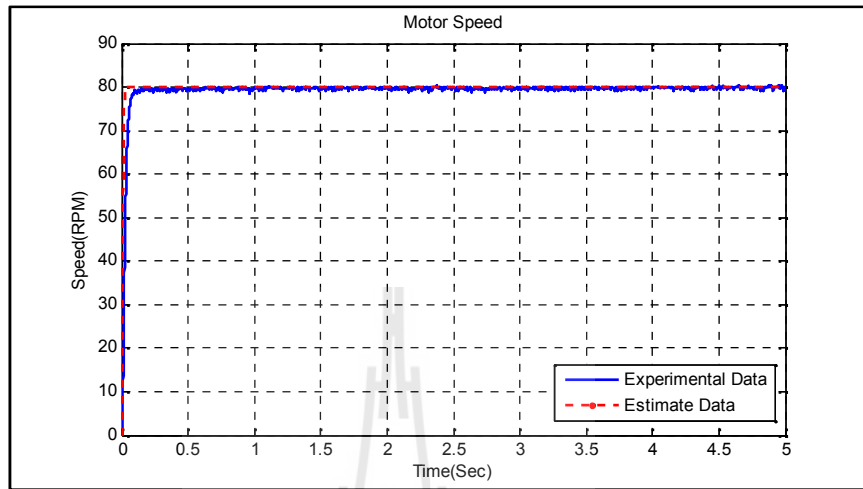


$$I = 3.69 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2, K_t = 1.50 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}, L_a = 9.52 \times 10^{-2} \text{ H}$$

$$b = 0.0423 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{red}, R_a = 4.7 \Omega, K_b = 1.30 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e \quad (4.4)$$

$$\hat{y} = [1 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \hat{''} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบใดๆต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อจะได้ค่าตัวแปรสเตตในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

พิจารณาคุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1

$$P_c = [B \ AB \ A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.59 \times 10^3 \\ 0 & 3.59 \times 10^3 & -2.17 \times 10^5 \\ 10.50 & -518.59 & -3.05 \times 10^5 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_c) = -1.3510 \times 10^8 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1 มีคุณสมบัติในการควบคุมได้  
พิจารณาคุณสมบัติความสังเกตได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_o) = 341.4169 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1 มีคุณสมบัติในการสังเกตได้  
การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา



$p(\cdot) = \cdot^2 + 2' \tilde{S}_n \cdot + \tilde{S}_n'^2$  และ เลือกอีกหนึ่งเทอม จาก 10 เท้าของเทอมจริงที่เลือก

เลือก  $\cdot' = 0.8$  และ  $\tilde{S}_n = 50 \text{ red/sec}$

ได้  $p(A) = A^3 + 480A^2 + 34500A + 1000000I$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix}^3 + 480 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix}^2$$

$$+ 34500 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix} + 1000000 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \times 10^6 & 2.39 \times 10^4 & 1.43 \times 10^5 \\ 0 & -1.51 \times 10^6 & 1.09 \times 10^6 \\ 0 & -4.99 \times 10^4 & -1.63 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $L = p(A)P_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ  $L = \begin{bmatrix} 419.4041 \\ 3187.9916 \\ -4777.0555 \end{bmatrix}$

พิจารณา

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\cdot} \\ \tilde{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.23 & 341.42 \\ 0 & -15.65 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\cdot} \\ \tilde{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 419.4041 \\ 3187.9916 \\ -4777.0555 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

พิจารณาคูสมบัติในการควบคุมได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2

$$P_c = [B \quad AB \quad A^2B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4.27 \times 10^3 \\ 0 & 4.27 \times 10^3 & -2.60 \times 10^5 \\ 10.50 & -518.59 & -3.27 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_c) = -1.9152 \times 10^8 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2 มีคุณสมบัติในการควบคุมได้

พิจารณาคูสมบัติความสังเกตได้ของระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \end{bmatrix}$$

$$\det(P_o) = 406.5041 \neq 0$$

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2 มีคุณสมบัติในการสังเกตได้

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต พิจารณา

$$p(s) = s^3 + 2' \dot{S}_n s^2 + \dot{S}_n^2 \text{ และ เลือกอีกหนึ่งในเทอม จาก 10 เท้าของเทอมจริงที่เลือก}$$

$$\text{เลือก } ' = 0.8 \text{ และ } \dot{S}_n = 50 \text{ red/sec}$$

$$\text{ได้ } p(A) = A^3 + 480A^2 + 34500A + 1000000I$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix}^3 + 480 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix}^2 \\ &+ 34500 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix} + 1000000 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \times 10^6 & 2.36 \times 10^4 & 1.70 \times 10^5 \\ 0 & -1.6 \times 10^6 & 1.17 \times 10^6 \\ 0 & -3.94 \times 10^4 & -1.71 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $L = p(A)P_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต คือ  $L = \begin{bmatrix} 419.1668 \\ 2883.8089 \\ -4197.7296 \end{bmatrix}$

พิจารณา

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -11.46 & 406.50 \\ 0 & -13.66 & -49.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{S} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10.50 \end{bmatrix} \cdot V_a + \begin{bmatrix} 419.1668 \\ 2883.8089 \\ -4197.7296 \end{bmatrix} y \quad (4.6)$$

### 4.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีเอาต์พุตคือตำแหน่งมุมของการเคลื่อนที่และอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้า พบว่าเป็นระบบอันดับ 1 (type-1) ซึ่งมี ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$G(s) = \frac{K_t}{s[L_a I s^2 + (R_a I + L_a b)s + (R_a b + K_t K_b)]} \quad (4.7)$$

จากระบบอันดับ 1 เมื่อพิจารณาระบบควบคุมวงปิด ที่สภาวะคงตัวนั้น เมื่อให้สัญญาณขั้นบันได ค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบควบคุมแบบพีดี เพื่อปรับปรุงการตอบสนองชั่วคราวให้ดีขึ้น

โดยทั่วไป ตัวควบคุมแบบพีดี สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ดังแสดง

$$G_c(S) = K_p + K_d s \quad (4.8)$$

ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดขึ้นก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น

#### 4.4 ตัวแปรตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ด้วยวิธี Gradient Method

พิจารณาการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง และตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยทดสอบให้แรงบิดคงที่แบบขั้นบันได และให้แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง เข้าไปรบกวนระบบจะสังเกตได้ว่าเมื่อนำความเร็วรอบที่สามารถวัดได้จริงมาเปรียบเทียบกับค่าประมาณค่าความเร็วรอบจากตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบจะส่งผลให้ตัวสังเกตประมาณค่าสถานะผิดพลาด เนื่องจากตัวสังเกตสามารถประมาณค่าภายในระบบได้เท่านั้น จึงจำเป็นต้องสร้างตัวชดเชยในการประมาณค่าแรงบิดภายนอก เพื่อทำงานร่วมกับตัวสังเกตในการประมาณค่าสถานะให้มีประสิทธิภาพ

ค่าตัวแปรการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง เมื่อแรงบิดภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของตัวสังเกตต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 1 มีตัวแปรชดเชยแบบปรับค่าได้ ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + a_1 \epsilon = -r_1$$

$$a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a J} + \frac{K_b K_t}{L_a J} \right] = 5.8978 \times 10^3$$

$$a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} \right] = 60.5959$$

$$r_1 = \frac{R_a}{L_a J} = 1.3452 \times 10^4$$

โดยระบบจะมีอัตราการปรับตัว = 0.1546

ระบบมอเตอร์บนข้อต่อที่ 2 มีตัวแปรชดเชยแบบปรับค่าได้ ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + a_1 \epsilon = -r_1$$

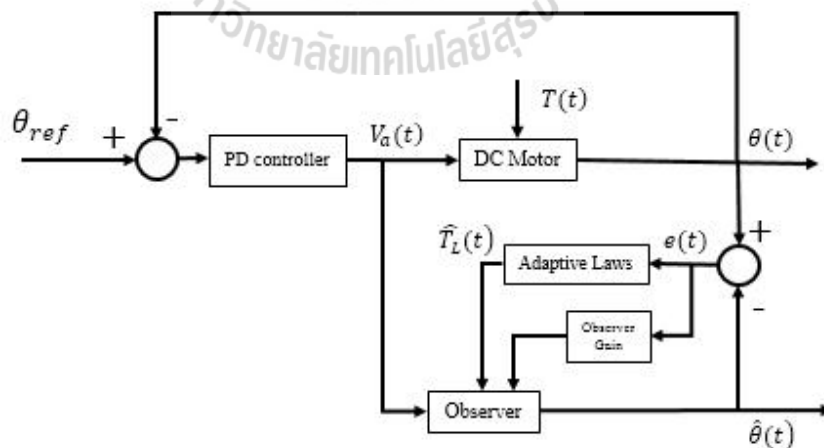
$$a_1 = \left[ \frac{R_a b}{L_a J} + \frac{K_b K_t}{L_a J} \right] = 6.1169 \times 10^3$$

$$a_2 = \left[ \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} \right] = 60.8332$$

$$r_1 = \frac{R_a}{L_a J} = 1.3379 \times 10^4$$

โดยระบบจะมีอัตราการปรับตัว = 0.1176

ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ สามารถเขียนแผนภาพการทำงานของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณแรงบิดโหลด ได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณแรงบิดโหลด

#### 4.5 การจำลองสถานการณ์ประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนแขนกลหุ่นยนต์

การจำลองสถานการณ์ของข้อต่อที่ 1 และข้อต่อที่ 2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณค่าของตัวสังเกต ร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยทำการจำลองสถานการณ์ในการเคลื่อนที่ของข้อต่อ ให้เคลื่อนที่ตามองศาที่กำหนด เริ่มต้นจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  และจากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  เพื่อทดสอบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ร่วมกับตัวสังเกตว่าสามารถประมาณค่าแรงบิดโพลต์ที่กระทำต่อแขนกลหุ่นยนต์ได้ จากนั้นจึงจะทำการทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณของตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ ต่อไป

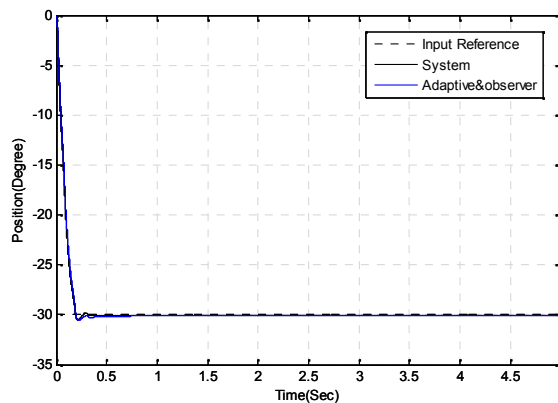
##### ข้อต่อที่ 1

กรณีที่ 1 เมื่อแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $(0,0.2)$  ไปยัง  $(-0.1,0.17)$

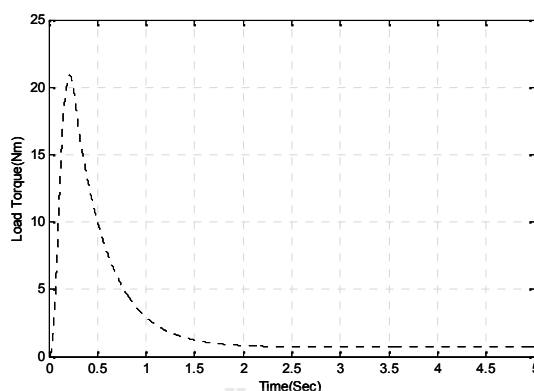
จากรูปที่ 4.4 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$



รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนอง  $\theta(t)$  และ  $\hat{\theta}(t)$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1

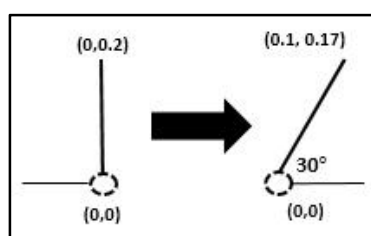


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนอง  $\hat{T}_L$  สำหรับแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 1

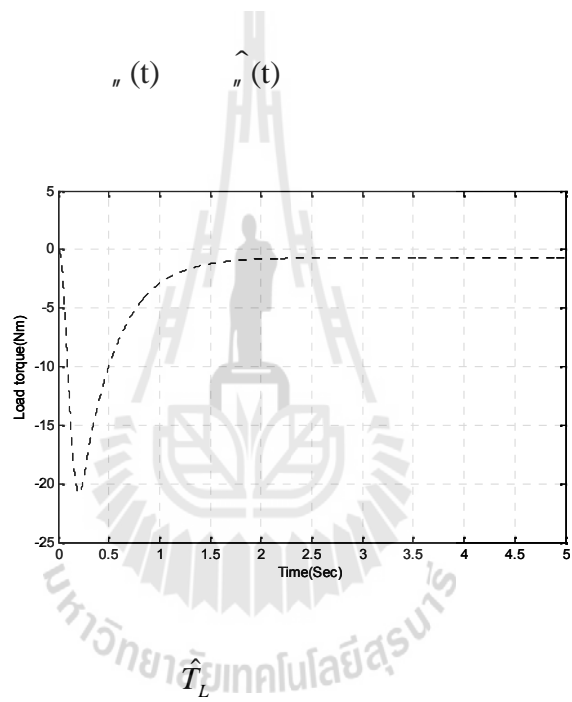
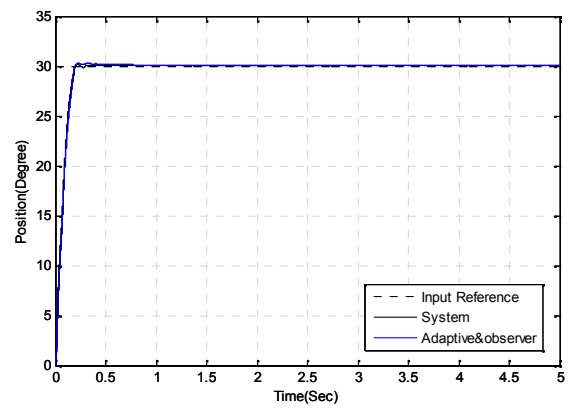
จะเห็นได้ว่า จากรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งระบบของมอเตอร์และการประมาณค่าตำแหน่งตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชย พบว่าตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพกับระบบจริง ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยประมาณแรงบิดเท่ากับ 0.7083 Nm เทียบกับการคำนวณเท่ากับ 0.6326 Nm เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ความผิดพลาดโดยเปรียบเทียบกับการคำนวณเท่ากับ 11.97%

กรณีที่ 2 เมื่อแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (0,0.2) ไปยัง (0.1,0.17)

จากรูปที่ 4.7 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $30^\circ$  เพื่อจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่เพื่อประมาณแรงบิดโพลด์ที่กระทำบนแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1

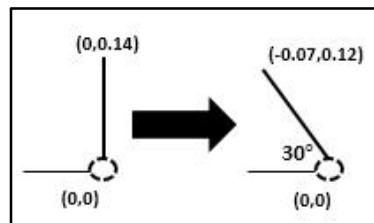


รูปที่ 4.7 การเคลื่อนที่ของแกนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 กรณีที่ 2

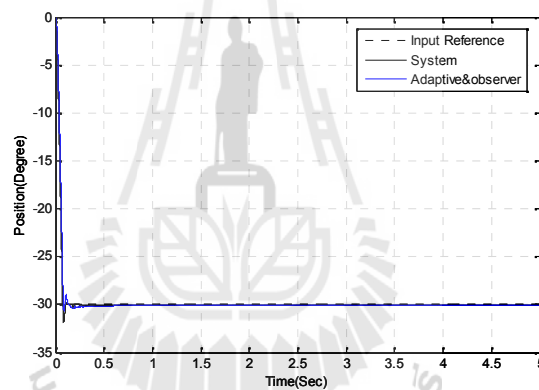




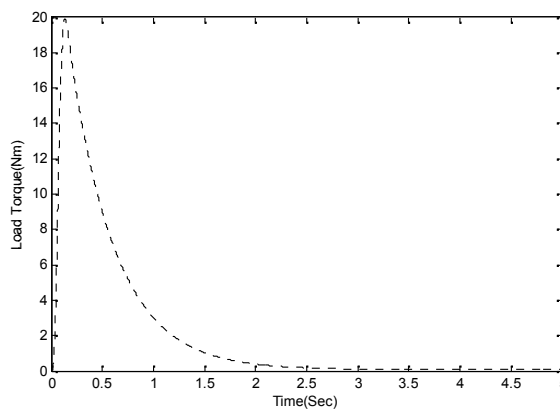
จากรูปที่ 4.10 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 1 เริ่มต้น จากตำแหน่ง  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  เพื่อจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่เพื่อประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนอง  $\theta(t)$  และ  $\hat{\theta}(t)$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1

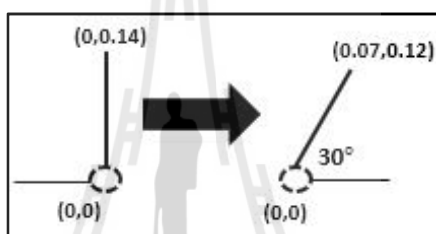


รูปที่ 4.12 ผลตอบสนอง  $\hat{T}_L$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 1

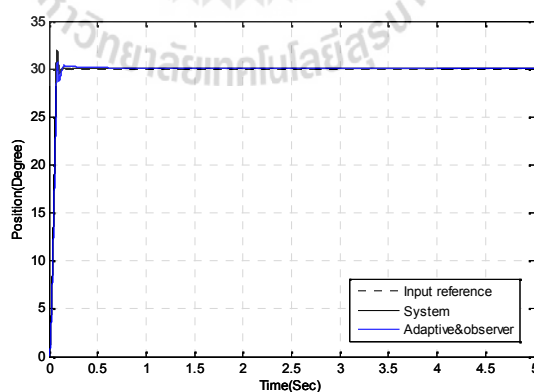
จะเห็นว่า จากรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งระบบของมอเตอร์และการประมาณค่าตำแหน่งตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชย ตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชยสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพกับระบบจริง และจากรูปที่ 4.12 แสดงตัวสังเกตพร้อมกับตัวชดเชยประมาณแรงบิดเท่ากับ 0.0712 Nm เทียบกับการคำนวณเท่ากับ 0.0727 Nm เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ความผิดพลาดโดยเปรียบเทียบกับการคำนวณเท่ากับ 2.11%

กรณีที่ 2 เมื่อแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (0,0.14) ไปยัง (0.07,0.12)

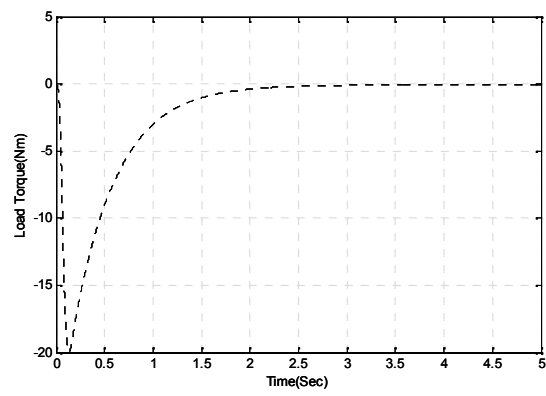
จากรูปที่ 4.13 แสดงการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกล เมื่อจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่จะเกิดแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อ



รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 2



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนอง  $\theta(t)$  และ  $\hat{\theta}(t)$  สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ข้อต่อที่ 2 กรณีที่ 2



## บทที่ 5

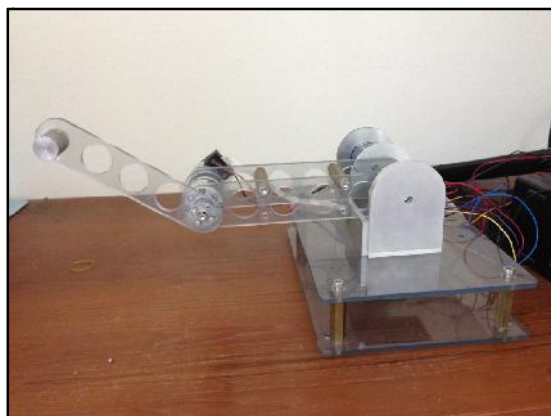
### ผลการทดสอบการประมาณค่าแรงบิดโหลดบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

#### 5.1 เครื่องมือทดลองและการติดตั้ง

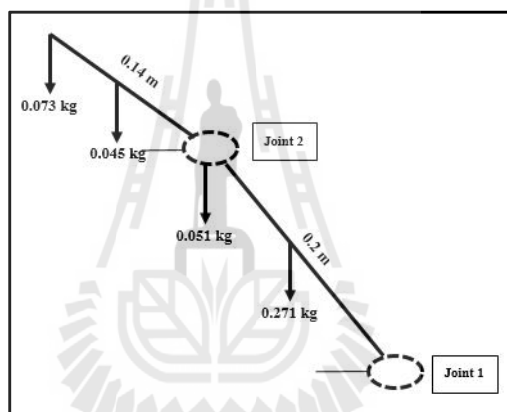
ในการทดลองนี้ผู้วิจัยทำการทดลองด้วยการเขียนอัลกอริทึมของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์กับส่วนที่เป็นแขนกลหุ่นยนต์ และรับสัญญาณป้อนกลับจากเอ็นโค้ดเดอร์ ด้วย RAPCON Board ซึ่งเป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ทดลองผ่านสาย Serial Crossover Cable ไปยัง PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์ ซึ่ง RAPCON Board จะเชื่อมต่อกับโปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนเสริม Real - Time Windows Target เป็นบอร์ดที่สามารถควบคุมแบบ Real Time ให้มีความสามารถในการรับ - ส่งสัญญาณที่มีลักษณะทั้ง Digital Signal และ Analog Signal โดยในการทดลองนั้น จะมี Power Amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ RAPCON Board และตัวบอร์ดจะทำการจ่ายกระแสไปยังแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ ตามคำสั่งในอัลกอริทึมที่ทำการเขียนไว้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นเมื่อแขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เอ็นโค้ดเดอร์ จะส่งสัญญาณไปยัง RAPCON Board เพื่อส่งต่อไปประมวลผลยังโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ ประกอบด้วย

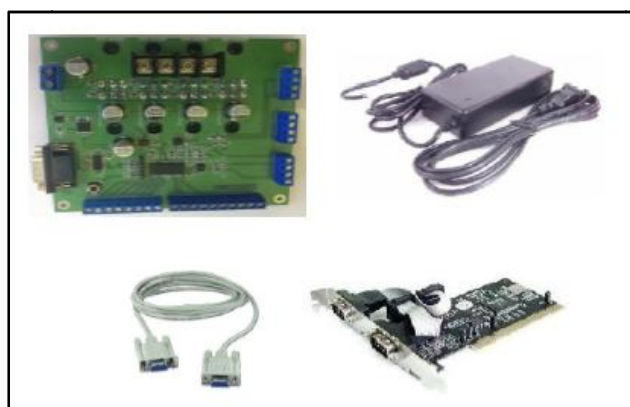
1. แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยข้อมูลของแขนกลหุ่นยนต์ที่ใช้การทดลองการประมาณโหลดบนข้อต่อแขนกล แสดงดังรูปที่ 5.2
2. บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ด และ PCI Serial Card แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 แสดงแขนกลหุ่นยนต์สองอิสระ สำหรับการทดลอง



รูปที่ 5.2 ข้อมูลของแขนกลหุ่นยนต์ที่ใช้การทดลองการประมาณค่าแรงบิดโหนดที่กระทำบนข้อต่อแขนกล

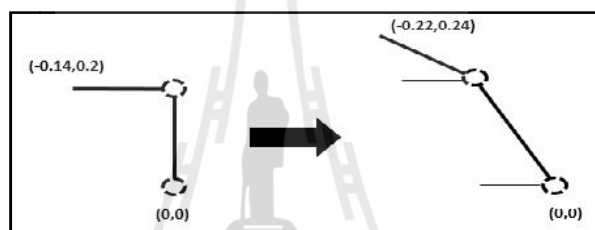


รูปที่ 5.3 บอร์ด RAPCON, อแดปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover

## 5.2 การทดสอบการประมาณแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลจากตำแหน่ง $(-0.14, 0.2)$ ไปยังตำแหน่ง $(-0.22, 0.24)$

การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ จะพิจารณาการเคลื่อนที่เริ่มต้นจากตำแหน่ง  $(-0.14, 0.2)$  ไปยังตำแหน่ง  $(-0.22, 0.24)$  ซึ่งข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก  $90^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $60^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยแต่ละข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์จะมีตัวควบคุมแบบพีดี 2 ชุด และกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

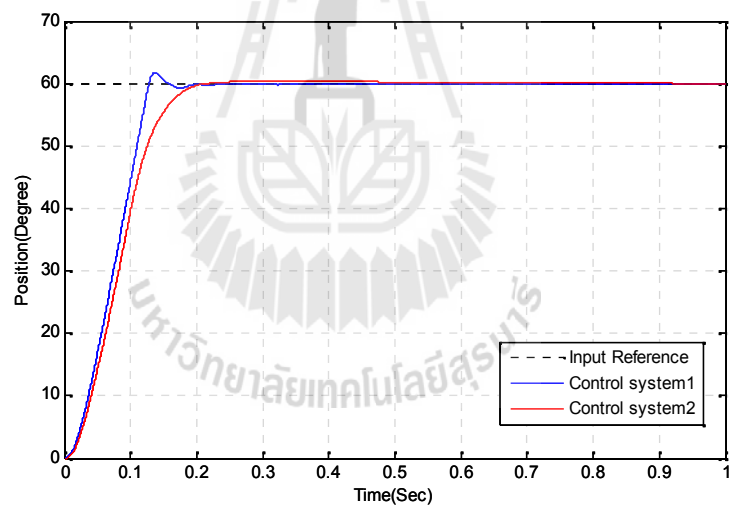
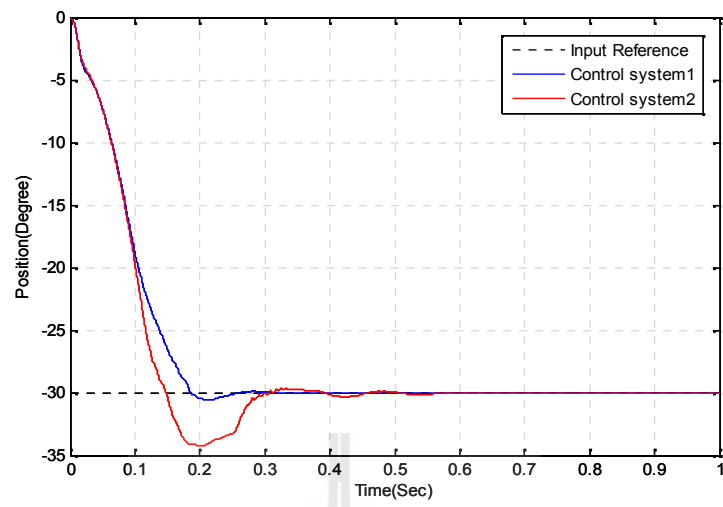
1. กรณีที่ 1 ข้อต่อที่ 1 และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่พร้อมกัน
2. กรณีที่ 2 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที
3. กรณีที่ 3 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที



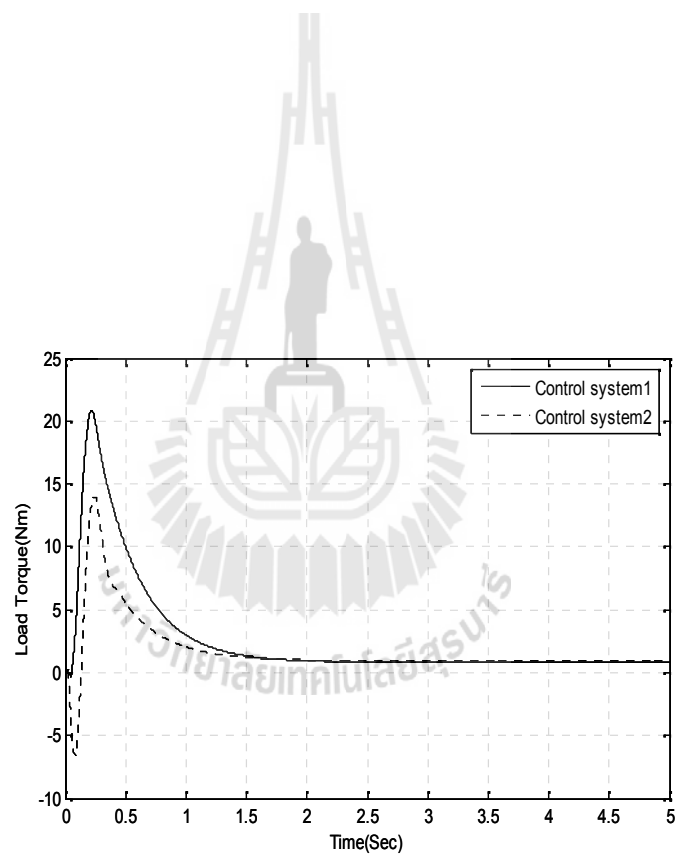
รูปที่ 5.4 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ

ในการออกแบบตัวควบคุมมุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีจำนวน 2 ชุดต่อ 1 ข้อต่อ โดยข้อต่อที่ 1 จะเริ่มต้นหมุนไปทางซ้ายที่ตำแหน่ง  $-30^\circ$  องศา ผลตอบสนองการควบคุมมุมของระบบควบคุม 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และข้อต่อที่ 2 จะเริ่มต้นหมุนไปทางขวาที่ตำแหน่ง  $60^\circ$  องศา ผลตอบสนองการควบคุมมุมของระบบควบคุม 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.7

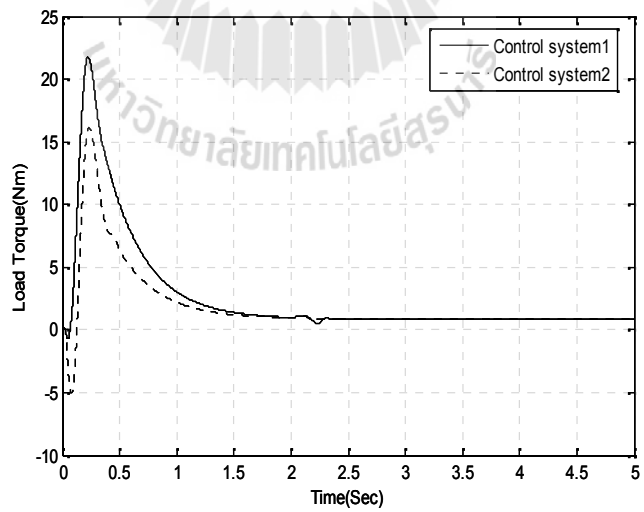
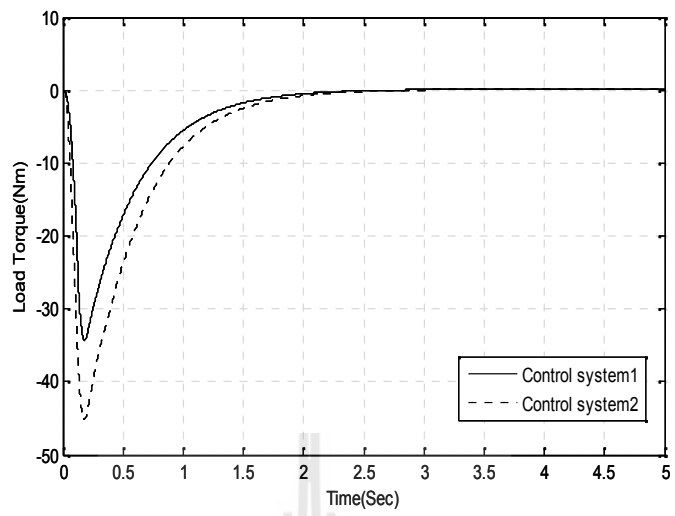
ค่าตัวแปรของ  $K_p$  และ  $K_d$  ของตัวควบคุมแบบพีดีแต่ละข้อต่อและระบบควบคุมที่ใช้ในสำหรับการทดลอง จะมีรายละเอียดของผลการตอบสนองของระบบควบคุมแต่ละชุด ต่ออินพุตแบบขั้นบันได (Step input) ซึ่งประกอบด้วย Rise time ( $t_r$ ), Settling time ( $t_s$ ) และ Percent overshoot ( $M_p$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5.1

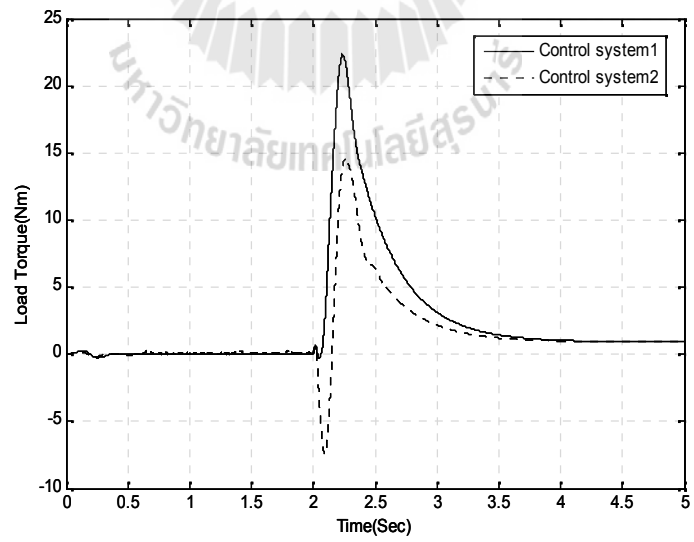
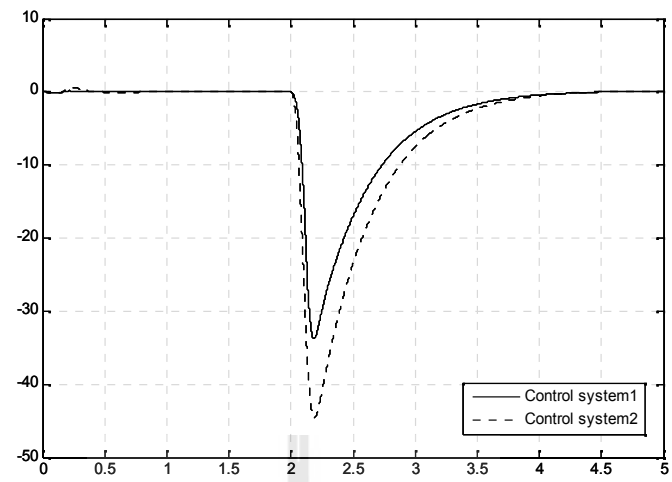


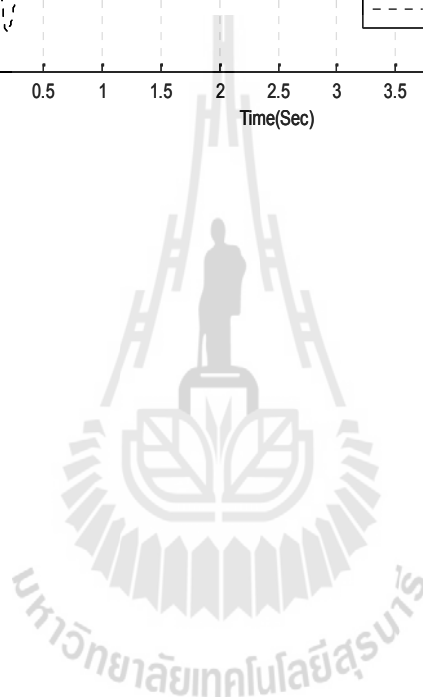
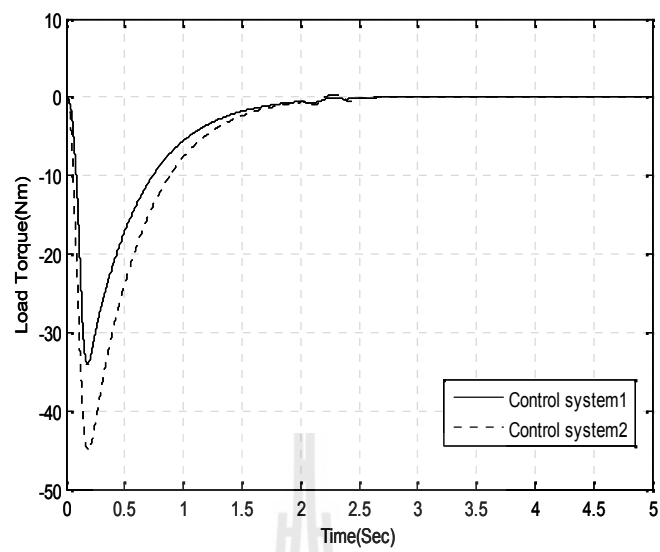
ข้อต่อที่	ระบบควบคุมที่	$K_p$	$K_d$	$t_r(\text{Sec})$	$t_s(\text{Sec})$	$M_p(\%)$
1	1	5.87	0.1943	0.18	0.28	4.66%
	2	15.67	0.1647	0.20	0.36	13.70%
2	1	2.33	0.1343	0.14	0.21	3.04%
	2	0.543	0.1345	0.18	0.25	-











กรณีที่	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	20.80	0.8167
	2	13.98	0.9557
2	1	21.81	0.8799
	2	16.07	0.8934
3	1	22.33	0.9276
	2	14.58	0.9182

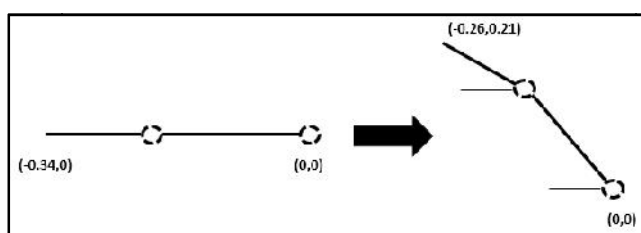
ตารางที่ 5.3 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2

กรณีที่	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	34.26	0.1173
	2	45.11	0.1104
2	1	33.75	0.1091
	2	44.57	0.1107
3	1	33.97	0.1304
	2	45.04	0.1135

### 5.3 การทดสอบการประมาณแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลจากตำแหน่ง $(-0.34,0)$ ไปยังตำแหน่ง $(-0.26,0.21)$

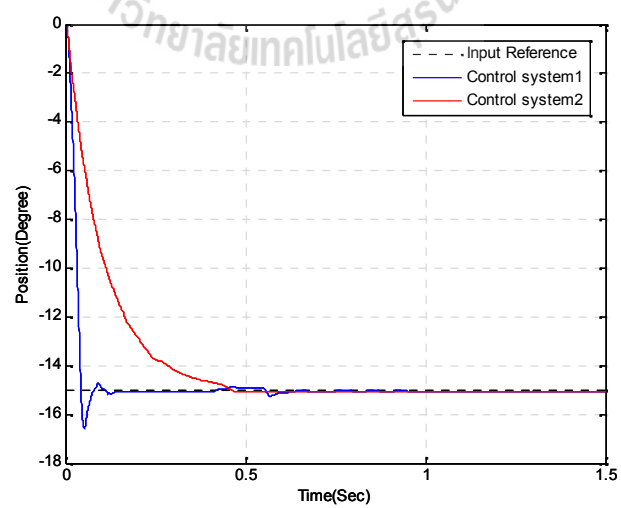
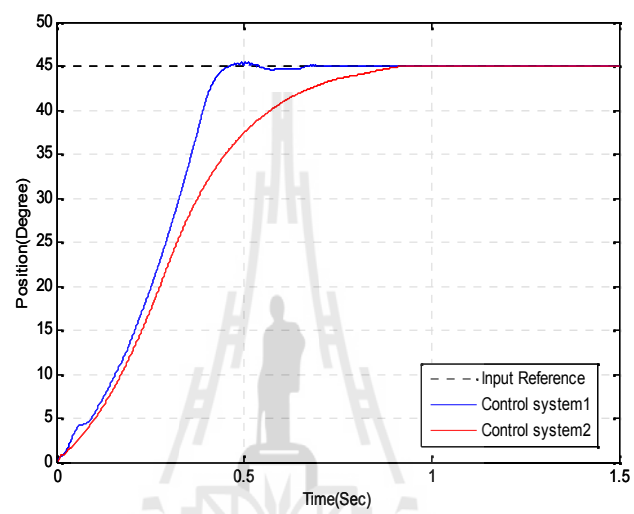
การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ จะพิจารณาการเคลื่อนที่เริ่มต้นจากตำแหน่ง  $(-0.34,0)$  ไปยังตำแหน่ง  $(-0.26,0.21)$  ซึ่งข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $45^\circ$  และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก  $0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-15^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยแต่ละข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์จะมีตัวควบคุมแบบพีดี 2 ชุด และกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. กรณีที่ 1 ข้อต่อที่ 1 และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่พร้อมกัน
2. กรณีที่ 2 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที
3. กรณีที่ 3 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที

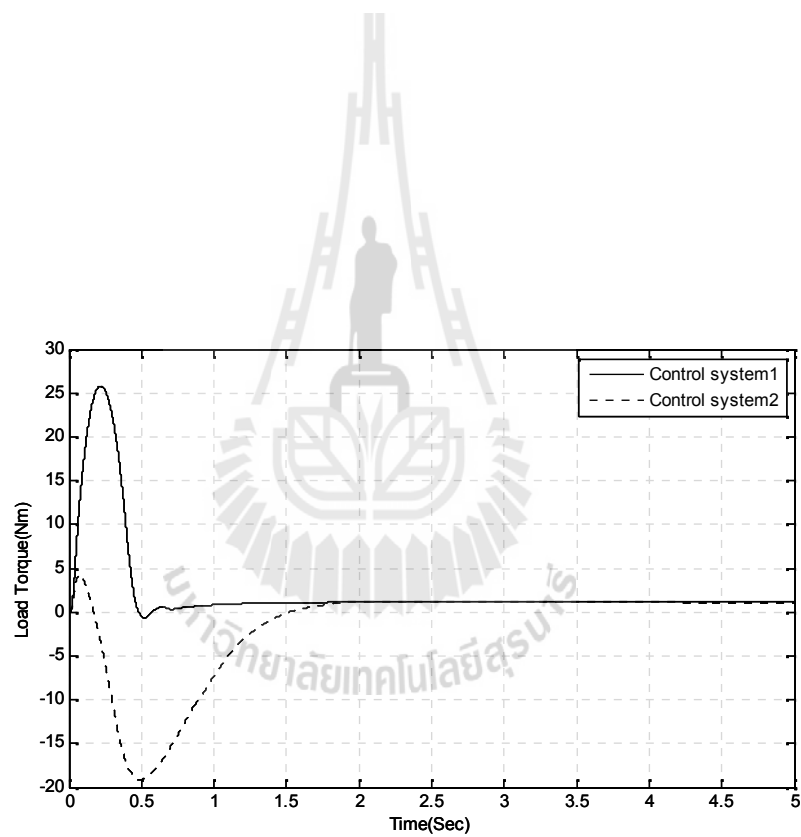


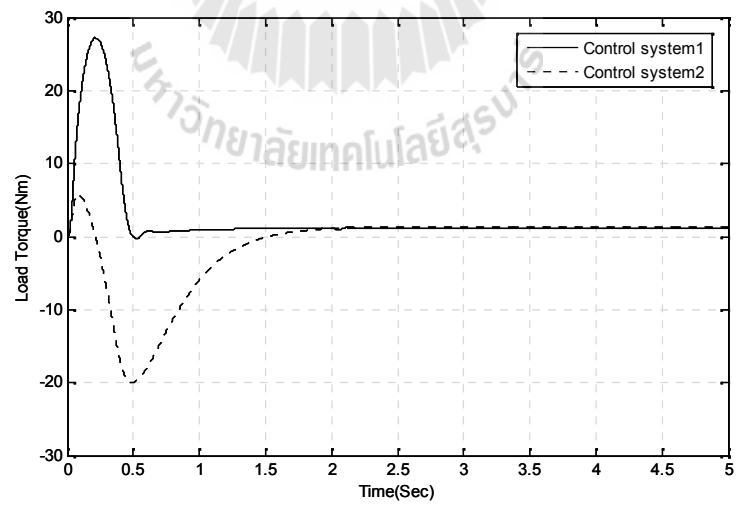
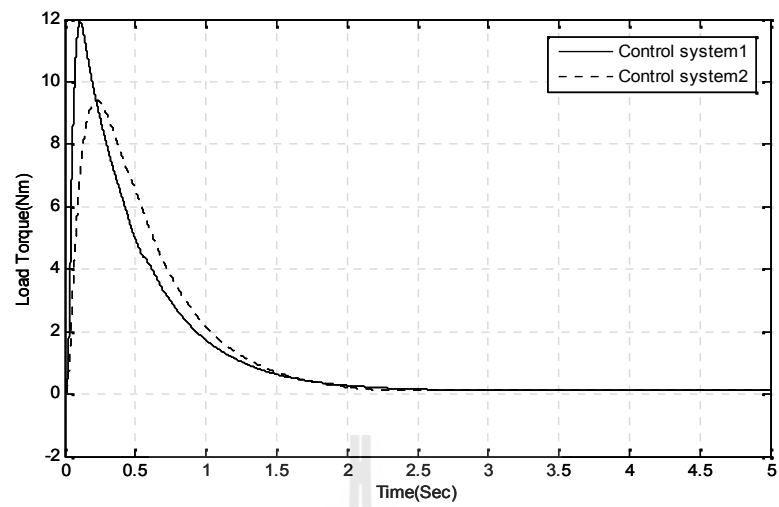
รูปที่ 5.13 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ

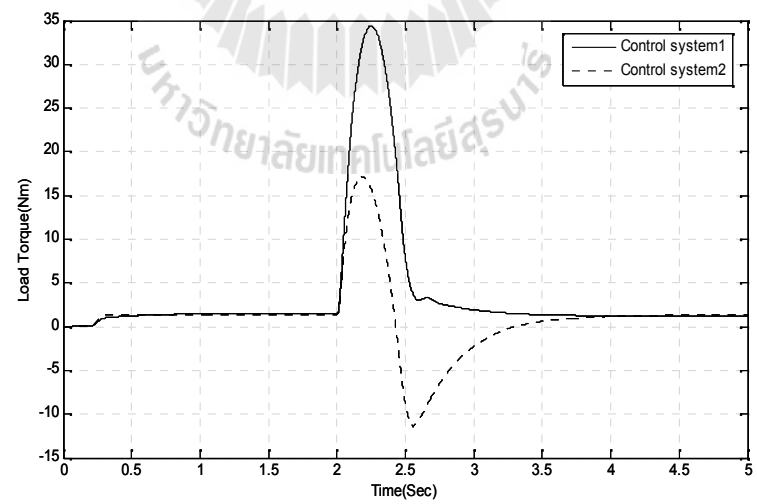
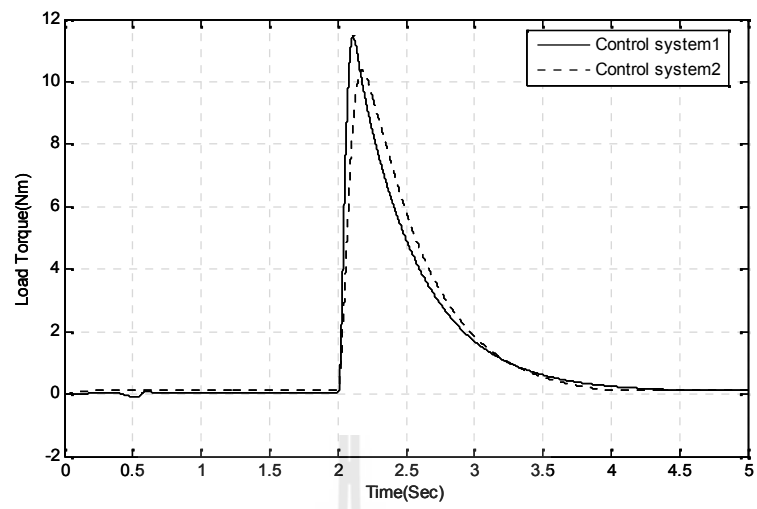
ในการออกแบบตัวควบคุมมุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีจำนวน 2 ชุดต่อ 1 ข้อต่อ โดยข้อต่อที่ 1 จะเริ่มต้นหมุนไปทางขวาที่ตำแหน่ง  $45^\circ$  องศา ผลตอบสนองการควบคุมมุมของระบบควบคุม 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และข้อต่อที่ 2 จะเริ่มต้น



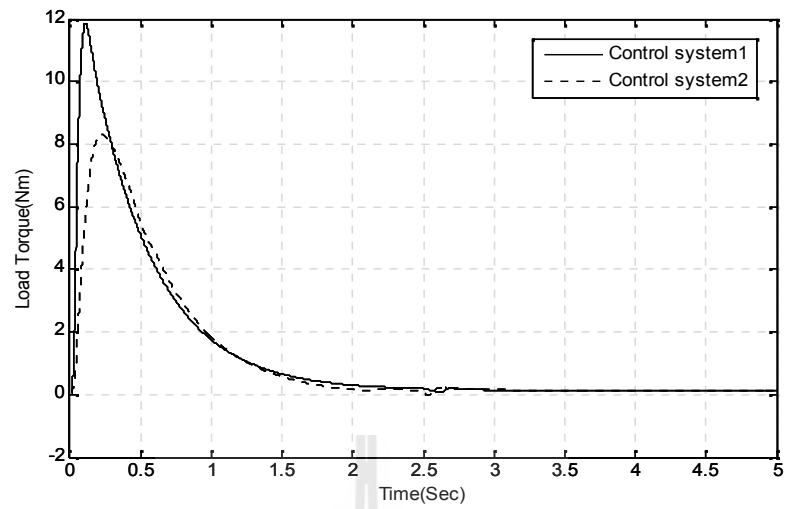
ข้อต่อที่	ระบบควบคุมที่	$K_p$	$K_d$	$t_r(\text{Sec})$	$t_s(\text{Sec})$	$M_p(\%)$
1	1	6.845	0.1648	0.41	0.43	-
	2	1.8976	0.1987	0.63	0.95	-
2	1	5.18	0.1164	0.05	0.17	5.67%
	2	1.3645	0.1640	0.29	0.50	-











กรณี	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	25.81	1.1538
	2	-19.13	1.1385
2	1	27.23	1.2156
	2	-20.01	1.2854
3	1	34.41	1.2077
	2	17.16	1.2942

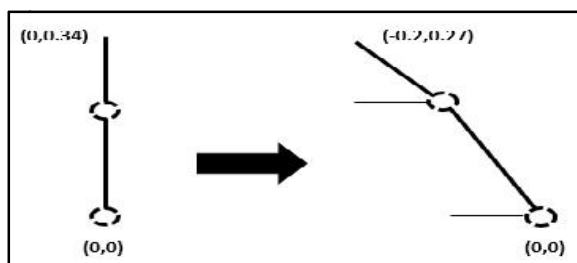
ตารางที่ 5.6 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2

กรณีที่	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	11.93	0.1094
	2	9.39	0.1087
2	1	11.46	0.1291
	2	10.38	0.1256
3	1	11.88	0.1291
	2	8.31	0.1267

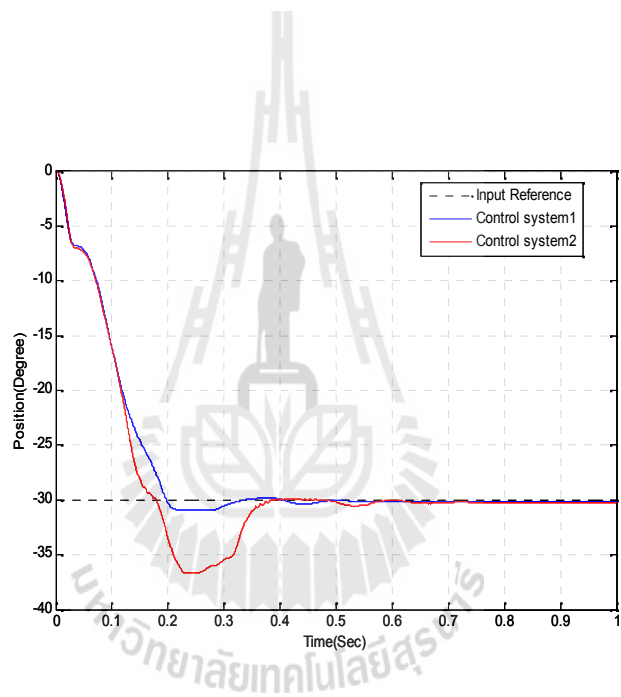
#### 5.4 การทดสอบการประมาณแรงบิดโหลดบนข้อต่อแขนกลจากตำแหน่ง (0,0.34) ไปยังตำแหน่ง (-0.2,0.27)

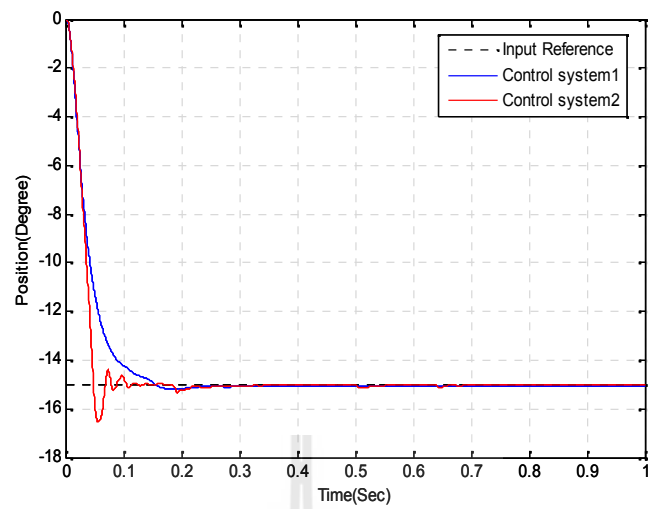
การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ จะพิจารณาการเคลื่อนที่เริ่มต้นจากตำแหน่ง (0,0.34) ไปยังตำแหน่ง (-0.2,0.27) ซึ่งข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก  $90^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-30^\circ$  และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก  $90^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $-15^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.22 โดยแต่ละข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์จะมีตัวควบคุมแบบพีดี 2 ชุด และกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. กรณีที่ 1 ข้อต่อที่ 1 และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่พร้อมกัน
2. กรณีที่ 2 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที
3. กรณีที่ 3 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที

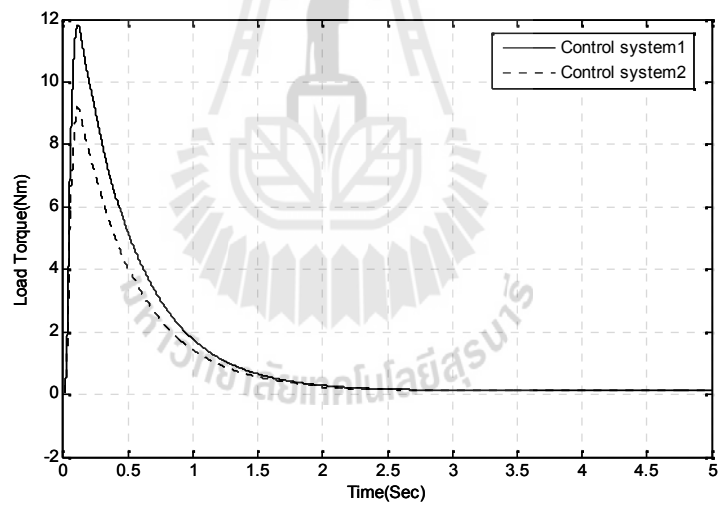
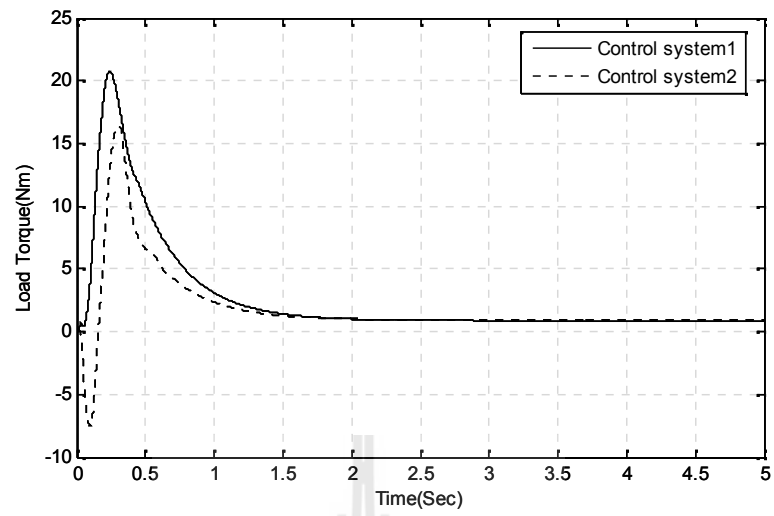


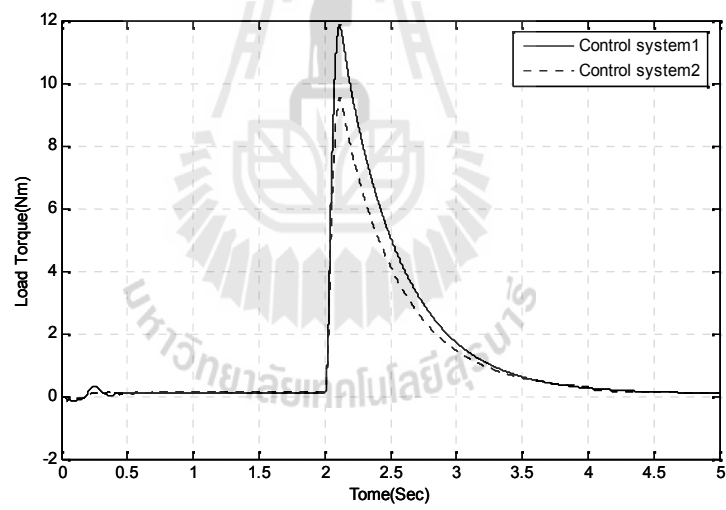
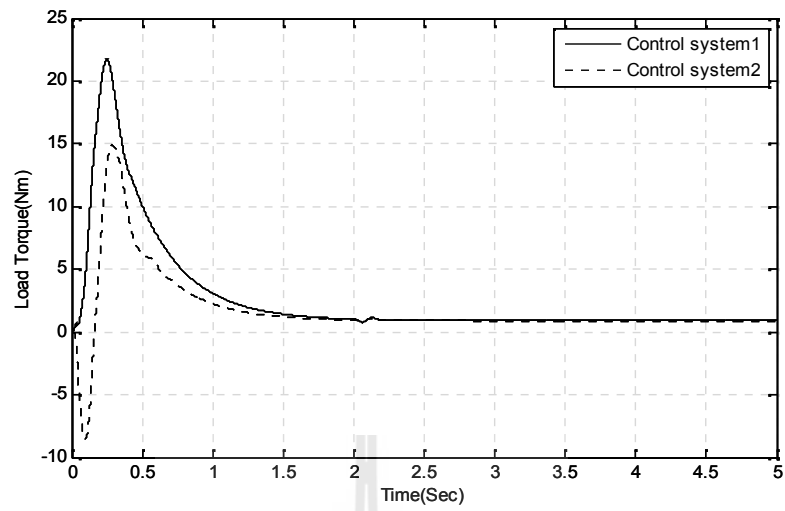
รูปที่ 5.22 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ

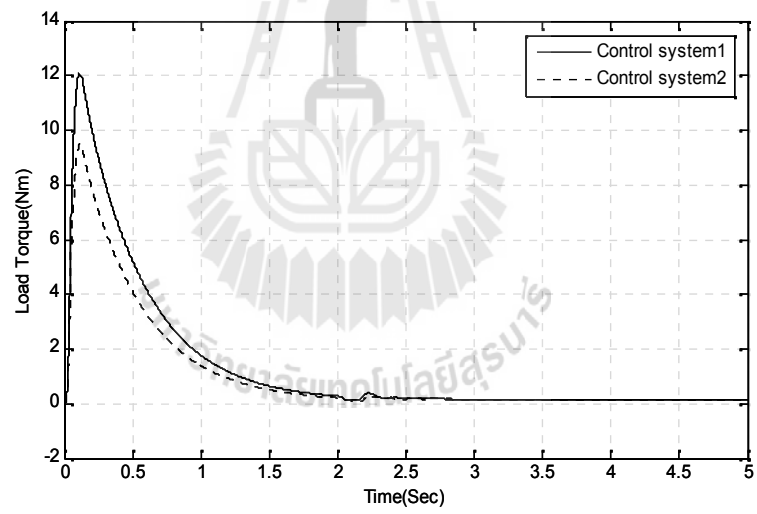
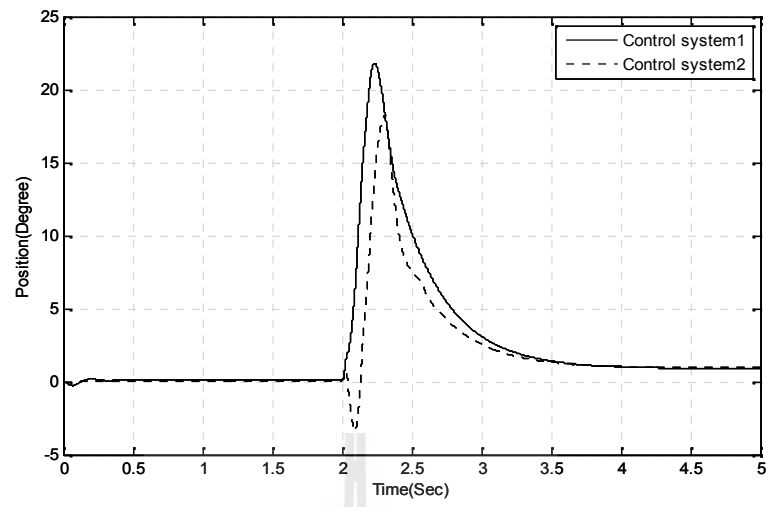




ข้อต่อที่	ระบบควบคุมที่	$K_p$	$K_d$	$t_r$ (Sec)	$t_s$ (Sec)	$M_p$ (%)
1	1	5.634	0.1978	0.22	0.38	2.68%
	2	12.657	0.1634	0.20	0.42	21.30%
2	1	5.97	0.1167	0.08	0.15	-
	2	13.28	0.1831	0.05	0.10	10.50%







ตารางที่ 5.8 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1

กรณี	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	20.75	0.8761
	2	16.35	0.9388
2	1	21.74	0.9023
	2	14.89	0.8887
3	1	21.81	0.8962
	2	18.21	0.9566

ตารางที่ 5.9 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2

กรณี	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	11.83	0.1061
	2	9.18	0.1047
2	1	11.85	0.1053
	2	9.52	0.1062
3	1	12.08	0.1035
	2	9.55	0.1015

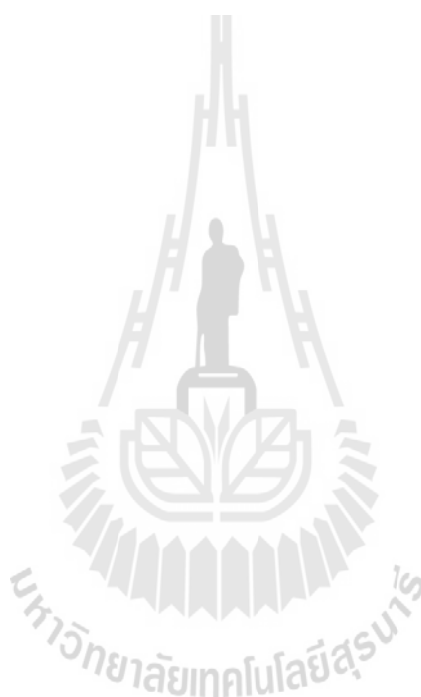
## 5.5 สรุป

จากผลการทดลองการประมาณแรงบิดโหลดบนข้อต่อของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ ทั้งหมด 3 การทดสอบ พบว่า การทดสอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 3 กับตัวควบคุมชุดที่ 1 และการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 1 กับตัวควบคุมชุดที่ 2 การทดสอบที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 3 กับตัวควบคุมชุดที่ 1 และการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 1 กับตัวควบคุมชุดที่ 1 และการทดสอบที่ 3 แสดงให้เห็นว่า การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุด



เกิดขึ้นในกรณีที่ 3 กับตัวควบคุมชุดที่ 1 และการประมาณค่าแรงบิดโหนดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2 ค่าแรงบิดโหนดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 3 กับตัวควบคุมชุดที่ 1

เมื่อเราสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหนดที่กระทำบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ในขณะที่เคลื่อนที่ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไม่ให้ภาระโหนดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และเป็นเพิ่มอายุการใช้งานของหุ่นยนต์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป



## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ ในการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถประมาณแรงบิดโหลดในการเคลื่อนที่ของแขนกลได้โดยไม่ต้องตั้งเซ็นเซอร์เพิ่มเติม ผลการตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำต่อข้อต่อในช่วงการตอบสนองชั่วครู่ของตัวควบคุมที่แตกต่างกันนั้น ทำให้เกิดค่าแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน

2. การใช้ตัวสังเกต ร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method สามารถประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนที่ได้

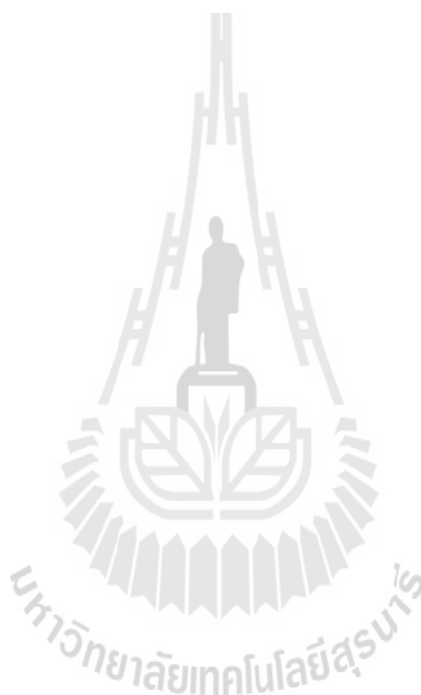
3. ออกแบบระบบควบคุมระบบแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ โดยใช้โปรแกรม MatLab/Simulink ผ่าน RAPCON Board เพื่อประมาณค่าแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนที่

4. สามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของข้อต่อแขนหุ่นยนต์สององศาอิสระ ด้วยการระบุเอกลักษณ์จากพหุนามการเคลื่อนที่ความเร็วรอบมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งสามารถอธิบายการตอบสนองทางพลวัตของการประมาณแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นได้

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ ถ้าต้องการที่จะให้ตัวสังเกตและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควรใช้กับระบบที่สามารถทราบค่าตัวแปรและโครงสร้างของระบบที่ต้องการ นอกจากนี้การใช้ตัวกรองสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

การทำงานวิจัยเพื่อพัฒนาต่อไปจากงานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ เนื่องจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่แต่ละแบบ และคอนโทรลเลอร์คนละชุดที่ใช้ในการควบคุมมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจากการทดลองแต่ละกรณีแสดงให้เห็นผลกระทบของแรงบิดที่เกิดขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ แรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ก่อนสภาวะคงตัวนั้นจะเป็นแนวทางพัฒนาการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไม่ให้ภาระโหลดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของหุ่นยนต์และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป



## รายการอ้างอิง

- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 2, 848 หน้า..
- สุวัฒน์ กุลธนปรีดา (2552). วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 352 หน้า.
- ชาญยุทธ ขจรไตรเดช (2550).การประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Richard C. Dorf and Robert H Bishop (2005). **Modern Control Systems**. (10<sup>th</sup> Edition), London, Pearson Education.
- Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark(1995). **Adaptive Control**. (2<sup>nd</sup> Edition), USA, Addison Wesley.
- Katsuhiko Ogata, 2002. **Modern Control Engineering**. (4<sup>th</sup> Edition), USA, Prentice Hall.
- D. W. Brookfield and R. A.Minard. (1961).Viscosity Measurement as Used for Automatic Process Monitoring, **Ann. N.Y. Acad. Sci.**, Vol. 91, No. 4, pp. 838–849.
- Kichul Hong and Kwanghee Nam, (1998). A Load Torque Compensation Scheme Under the Speed Measurement Delay. **Journal of IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol.45, Issue 2, pp.283–290.
- Dupuis,A.,Ghribi, M., and Kaddouri, A. (2004). Multiobjective genetic estimation of DC motor parameter and load torque. **International Conference on Industrial Technology(ICIT)**Vol.3, pp.1511–1514.
- Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005). Nolinear Torque Control for PMSM: A Lyapunov Technique Approach. **World Academy of Science Engineering and Technology 6**. pp.118–121.
- Samuel E. de Lucena and Walter Kaiser. (2008). Stepping –Motor-Driven Constant -Shear -Rate Rotating Viscometer. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol. 57, No. 7,pp. 1338–1343.

- Chin Chih Ou and Tien Chi Chen.(2012).Power-Assisted Wheelchair Design base on a Lyapunov Torque Observer. **International Journal of Innovation Computing, Information and Control**,Vol. 8, pp. 8089–8102.
- Jong Sun Ko,Young Seok Jung, Sung Kwun Kim and Myung Joong Youn, (1995). MRAC Load Torque Observer for Position Control of Brushless DC Motor. **Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems**, pp.622–627.
- Srisertpol, J., and Khajorntraidet, C. (2009). Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation. **Proceeding CCDC'09 Proceedings of the 21st annual international conference on Chinese Control and Decision Conference**, pp.767–772.



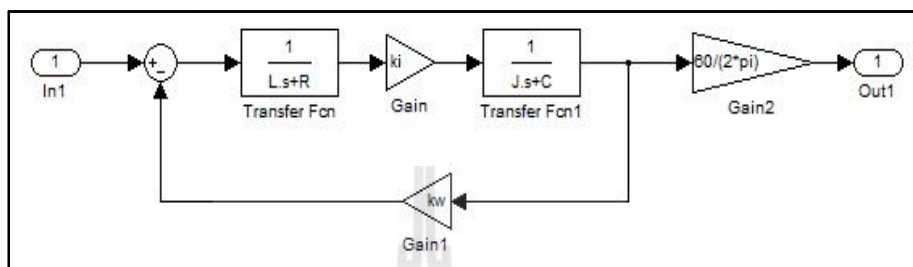
ภาคผนวก ก

การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ก.1 การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

1. สร้างแบบจำลองของระบบโดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรของที่ต้องการ ให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปร



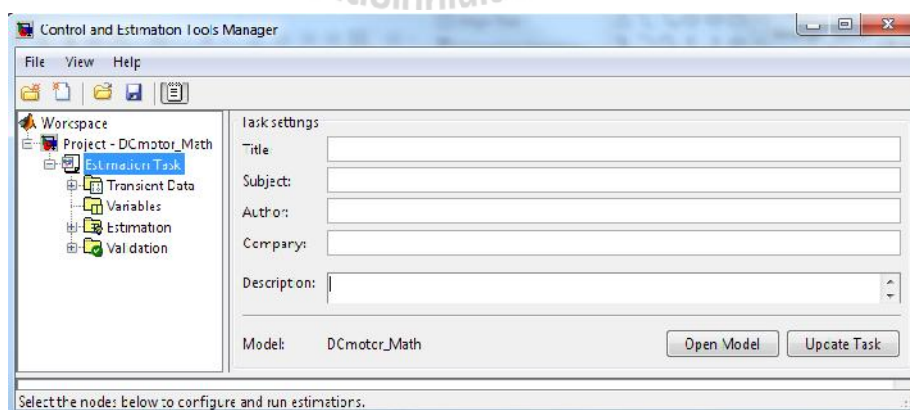
รูปที่ ก.1 แผนภาพการจำลองระบบเทียบเท่าใน Simulink

กำหนด Initial ให้กับพารามิเตอร์ที่จะประมาณค่า ใน Command Window ดังนี้

```
>> R=3.57;L=0.00194;B=4.36e-5;J=5.03e-6
```

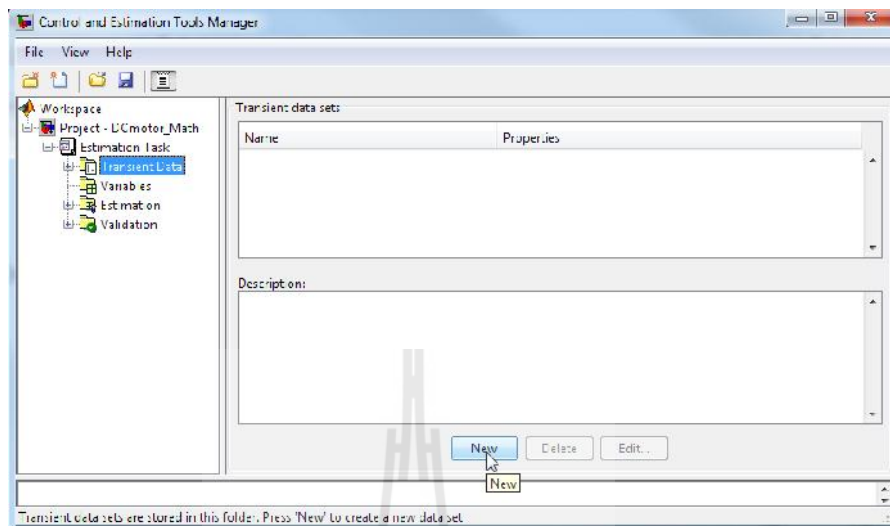
```
>> kw=0.0413;ki=0.0164
```

2. เปิด Parameter Estimation เลือก tools => **Parameter estimation** จะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมา



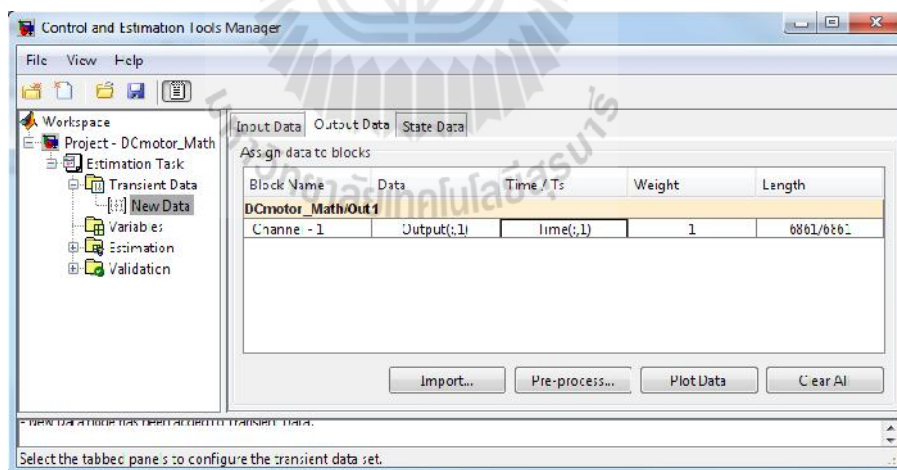
รูปที่ ก.2 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tools Manager

3. Click เลือก **Transient Data** => **New**



รูปที่ ก.3 แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data

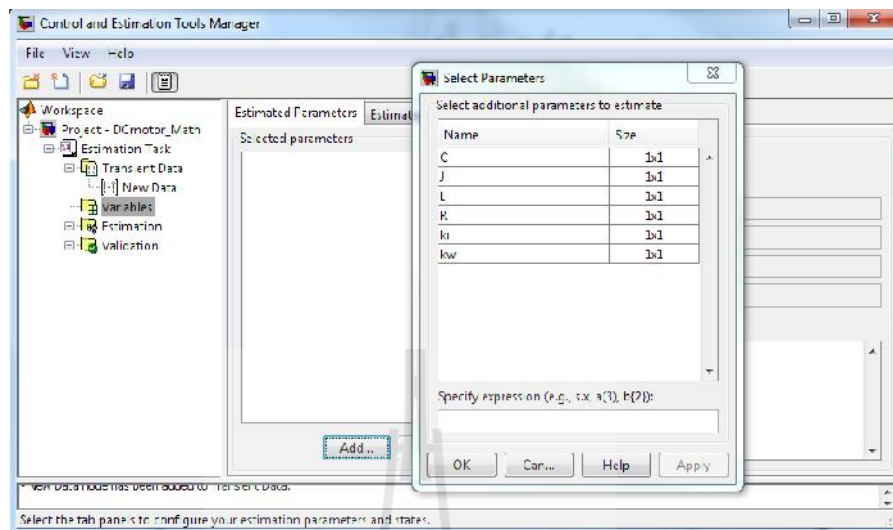
4. Click **New Data** เพื่อ Import data ทั้ง Input Data และ output Data



รูปที่ ก.4 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า

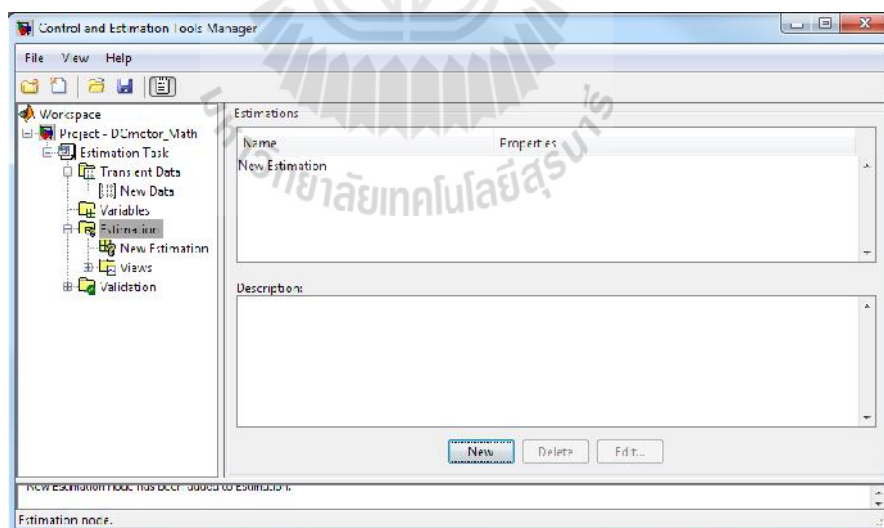


5. Click **Variables** => **Add** => เลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า => **OK**



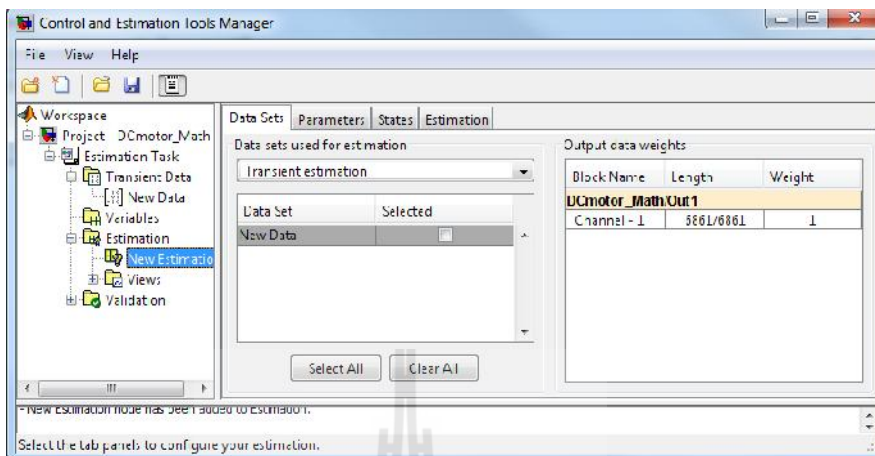
รูปที่ ก.5 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณ

6. Click **Estimation** => **New** (จะปรากฏ New Estimation ) แสดงดังรูปที่ ก.6



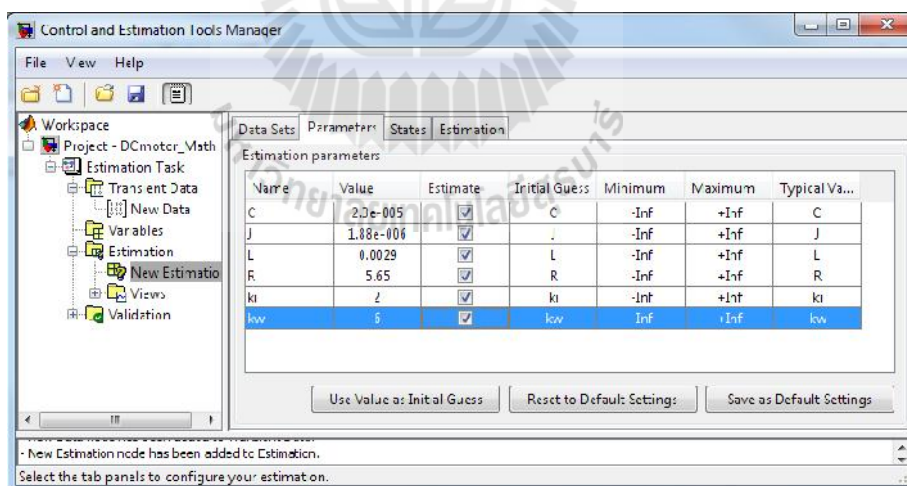
รูปที่ ก.6 แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation

7. Click **New estimation** => **select all**

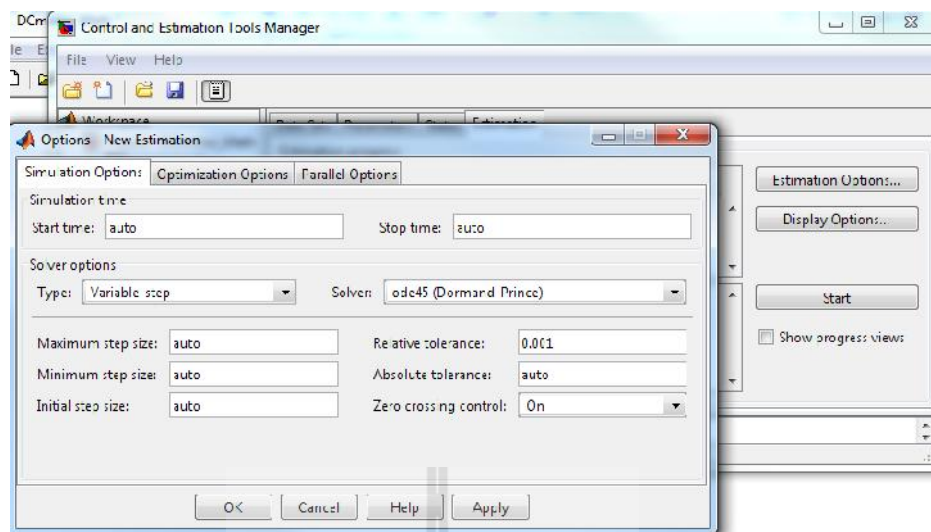


รูปที่ ก.7 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate

8. Click **Parameters** => Click เลือก Estimate ทุกตัวแปร ดังรูปที่ ก.8 และ Click **Estimation** => **Estimation Option** เพื่อกำหนด อัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร ดังรูปที่ ก.9

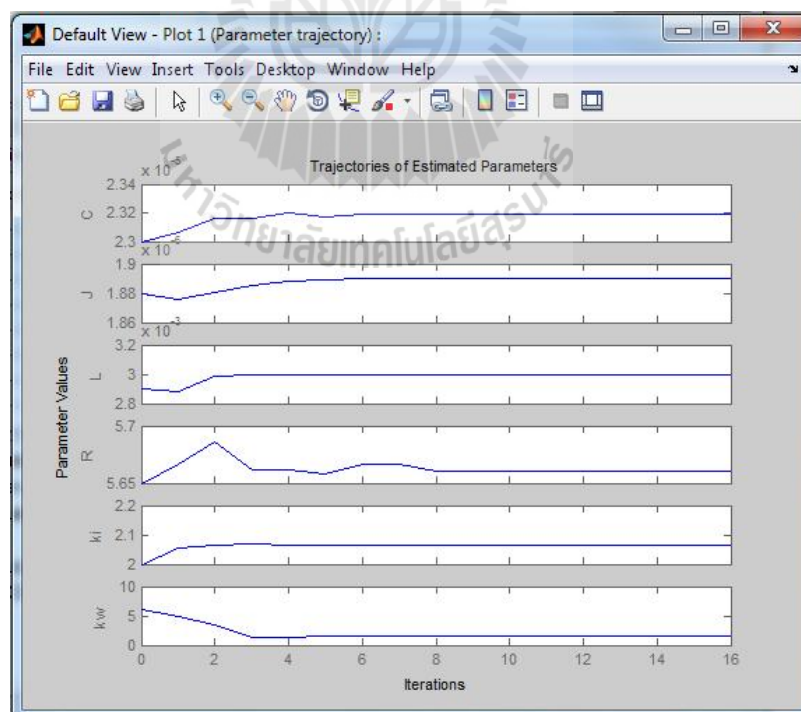


รูปที่ ก.8 แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณ



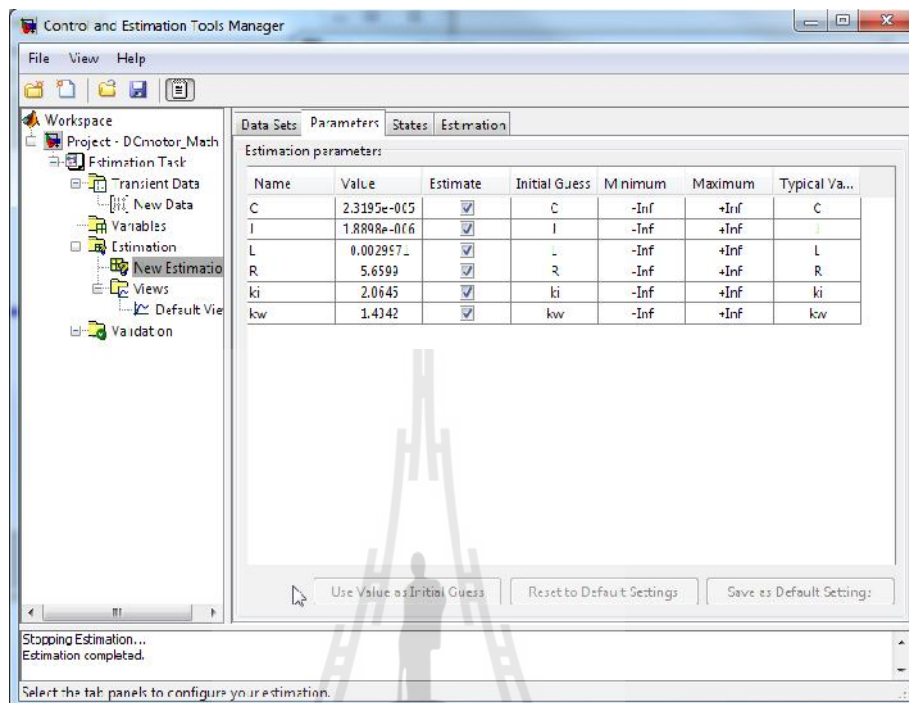
รูปที่ ก.9 แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร

9. Click **Estimation** => **Show progress views** (เพื่อแสดงกราฟการประมาณค่าตัวแปรและกราฟการตอบสนองที่ได้จากการประมาณ) => **Start** ดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.10 แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร

10. Click **Parameters** เพื่อดูค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้

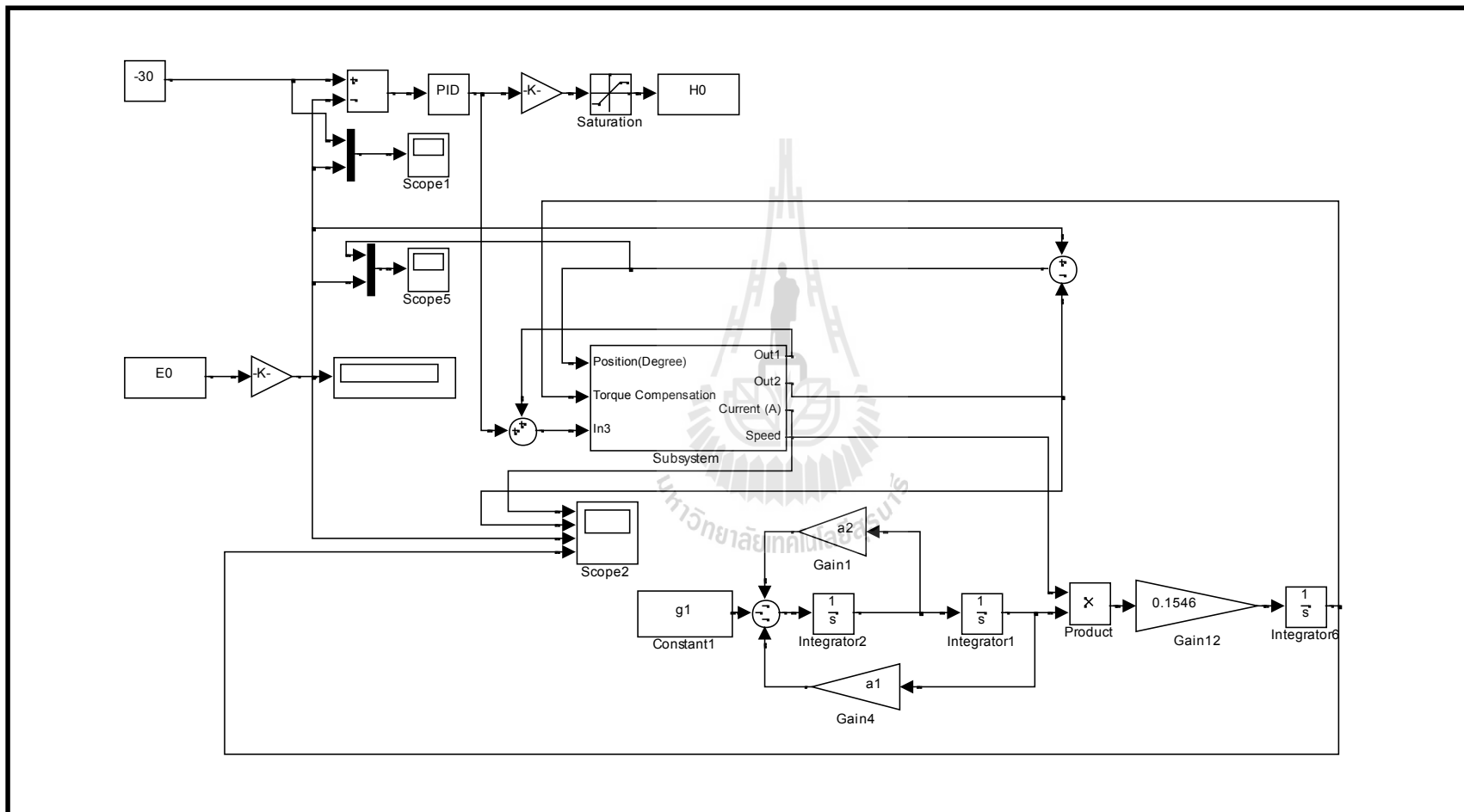


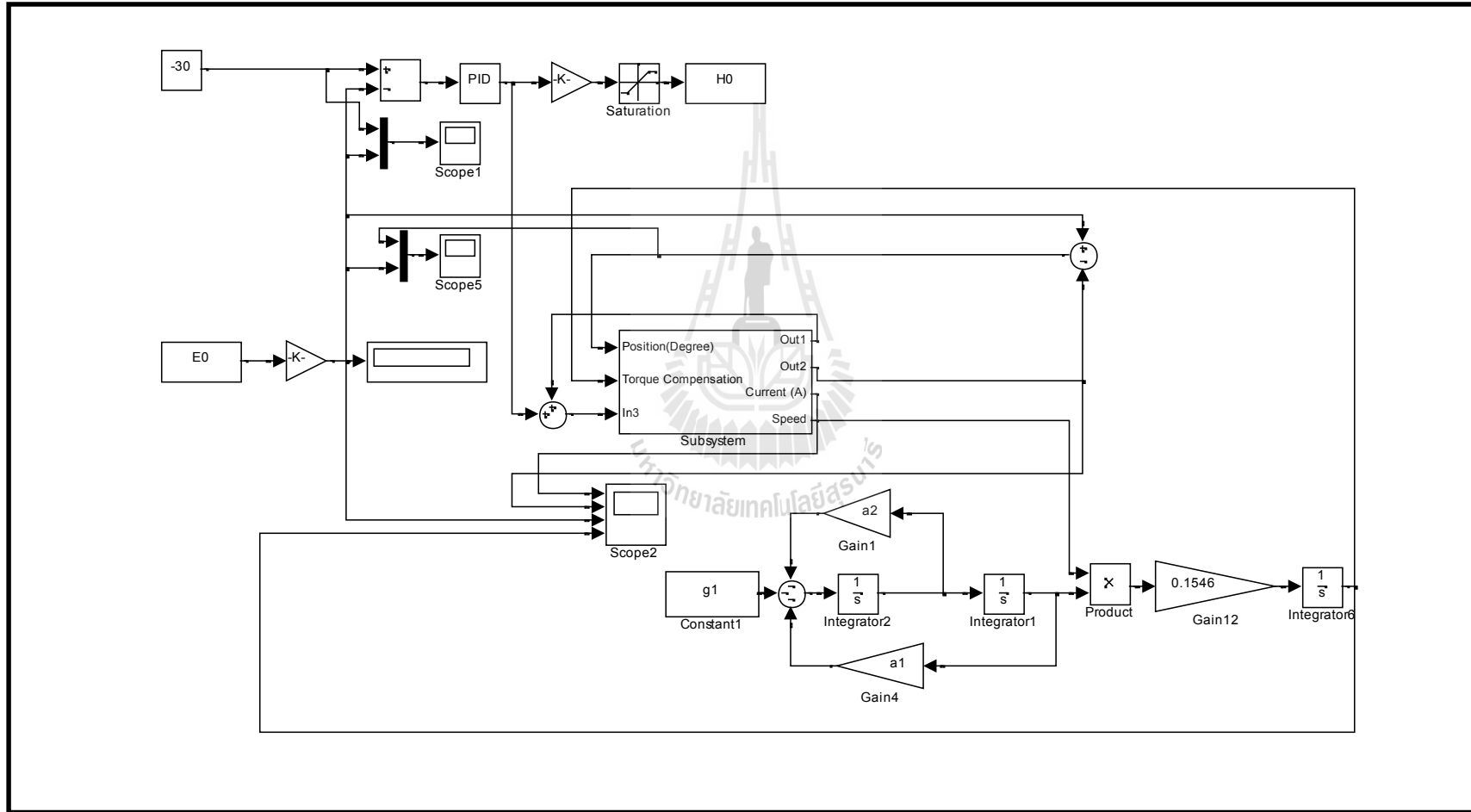
รูปที่ ก.11 แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้

ภาคผนวก ข

ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อ  
แกนกลสององศาอิสระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





ภาคผนวก ค

ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board และการติดตั้ง Hardware

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

### 1. INTRODUCTION

The HILINK platform offers a seamless interface between physical plants and Matlab/Simulink for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems. It is fully integrated into Matlab/Simulink and has a broad range of inputs and outputs. The platform is a complete and low-cost real-time control system development package for both educational and industrial applications.

The HILINK platform consists of the real-time control board (hardware) and the associated Matlab interface (software). The hardware of the HILINK platform has  $8 \times 12$  bit analog inputs,  $2 \times 16$  bit capture inputs,  $2 \times 16$  bit encoder inputs,  $1 \times 8$  bit digital input,  $2 \times 12$  bit analog outputs,  $2 \times 16$  bit frequency outputs,  $2 \times 16$  bit pulse outputs and  $1 \times 8$  bit digital output. The board also contains 2 H-bridges with 5 A capability to drive external heavy loads. Some inputs and outputs are multiplexed to simplify the hardware. The board is interfaced to the host computer that runs Matlab through a serial port. The software of the HILINK platform is fully integrated into Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target and comes with Simulink library blocks associated with each hardware input and output. The library contains Analog Input Block, Capture Input Block, Encoder Input Block, Digital Input Block, Analog Output Block, Frequency Output Block, Digital Output Block and Pulse Output Block. The platform achieves real-time operation with sampling rates up to 3.8 kHz.

The HILINK platform has been developed to extend and optimize the real-time operation of Matlab, Simulink and Real-Time Windows Target. The developed platform is uniquely integrated into Matlab to achieve real-time operation in Matlab under Windows. The salient features of the HILINK platform make it ideal for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems in both educational and industrial applications.

#### 1.1. Specifications

- Power supply: 6 – 15 V, minimum 0.15 A, regulated
- Interface: 115200 baud, 8 bit data, no parity, 1 stop bit
- Analog inputs: A0–A7, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Capture inputs: C0–C1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Digital inputs: D0.d0–D0.d7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Encoder inputs: E0–E1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Frequency outputs: F0–F1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution

- Analog outputs: B0–B1, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Digital outputs: G0\_g0–G0\_g7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Pulse outputs: H0–H1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Filtered pulse outputs: L0–L1, 0 – 5 V analog
- H-bridge outputs: P0–P1, 0–(supply voltage) V digital, 5 A
- Voltage regulator output: VDD, 5 V, 0.25 A, regulated power supply
- Ground: GND, 0 V
- Sampling rate: up to 3.8 kHz

### 1.2. Requirements

- PC with Windows XP or later and an available serial port or an expansion slot for a serial card
- Serial crossover (null modem) cable
- Matlab R2007b or later with Simulink, Real-Time Workshop and Real-Time Windows Target
- HILINK hardware (real-time control board) 1.4 or later
- HILINK software 1.4 or later
- Power supply (regulated, 6 – 15 V and at least 0.15 A without any load)

### 1.3. Absolute Maximum Ratings

- Power supply voltage: minimum 3 V, maximum 16 V
- Each analog, digital, capture and encoder input: minimum –0.3 V, maximum +5.3 V
- Each analog, digital, frequency and pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each filtered pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each H-bridge output: minimum –5 A, maximum +5 A
- Total current from/into all inputs and outputs (except power supply, voltage regulator and H-bridges): minimum –200 mA, maximum +200 mA
- Voltage regulator output: maximum 0.5 A (total)
- Operating ambient temperature: minimum 10 °C, maximum 50 °C

## 2. HARDWARE

The real-time control board is based on a dsPIC30F2012 digital signal controller. It has a total number of  $8 \times 16$  bit inputs and  $8 \times 16$  bit outputs capability. The inputs and outputs can be selected among the inputs and outputs listed above. The board is interfaced to the main computer that runs Matlab through a serial port. Two pulse-width modulation driven H-bridges with 5 A drive capability are included on the board to drive external actuators or loads. The functional block diagram of the board is shown in Figure 1, where A0–A7 are the analog inputs, B0–B1 are the analog outputs, C0–C1 are the capture inputs, D0\_d0–D0\_d7 are the digital inputs, E0–E1 are the encoder inputs, F0–F1 are the frequency outputs, G0\_g0–G0\_g7 are the digital outputs and H0–H1 are the pulse outputs; ADC represents the analog-to-digital converter, DAC represents the digital-to-analog converter, ICM represents the input-capture module, OCM represents the output-compare module, DIP represents the digital-input port, DOP represents the digital-output port, QEM represents the quadrature-encoder module and PWM represents the pulse-width modulator; FLs are the lowpass filters with outputs L0–L1 and HBs are the H-bridges with outputs P0–P1; and  $\mu C$  is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

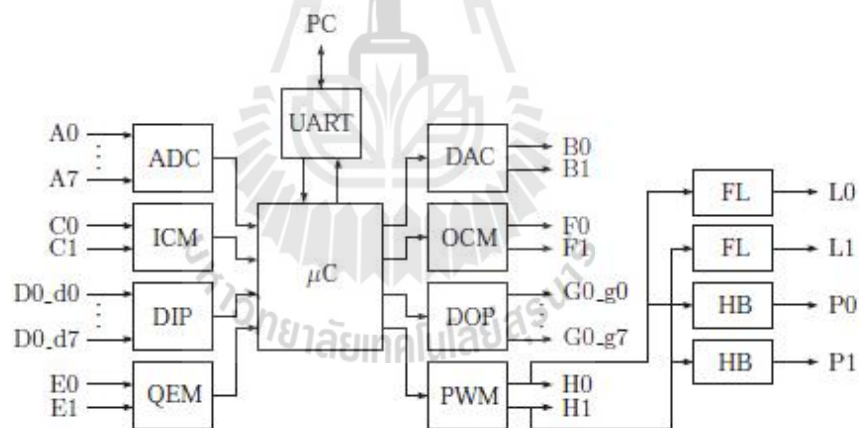


Figure 1. Functional block diagram of the board.

The layout of the board is shown in Figure 2. The inputs and outputs are connected to the board through standard pin header type connectors. The pins of all connectors are clearly indicated on the board for convenience. Access to the on-board 5 V, 0.25 A voltage regulator output is also provided for external light power supply requirements.

## ค.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2007b หรือเวอร์ชันที่สูงกว่ากับ Windows
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
3. ติดตั้ง Real – Time Workshop และ Real – Time Windows Target
4. โหลดไฟล์ติดตั้งจาก Website <http://zeltom.com> ติดตั้งไฟล์ rapcon2009b.exe ซึ่งในที่นี้ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009b สำหรับ Windows 7 จะมีไฟล์ rtw\_2009b\_win7\_fix.zip มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้
  5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtw\_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น  
 “C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปลี่ยน ชื่อไฟล์ rtw\_main.c เป็น rtw\_main.org และ copy ไฟล์ rtw\_main.c ในโฟลเดอร์ติดตั้งของ Rapcon มาใส่ไว้ใน Directory นี้
  6. เข้าไปที่ Control Panel -> Device Manager เพื่อทำการเปลี่ยน Base Address และตรวจสอบ Comport Number ของ Serial Port หลังจากนั้นดูที่ Base Address ตัวแรกว่ามี I/O Range เท่าไร เช่น I/O Range EC80 - EC87, Base Address คือ EC80 ในเลขฐาน 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับเลขฐานสองคือ 60544 แล้วเข้าโปรแกรม MATLAB ไปในโฟลเดอร์ไฟล์ติดตั้งของ Rapcon เปิดไฟล์ชื่อ rtwinpi.tlc และ rtwino.tlc แล้วทำการแก้ไขใน m.file ดังนี้  

```
if DrvAddress == 5 assign ::com = 1016 endif
```
  7. สำหรับ Windows 7 Real-Time Windows Target จะถูกป้องกันไว้ดังนั้นจะต้อง copy ไฟล์ rtwtkrnl.sys ใน rtw\_2009b\_win7\_fix.zip ที่โหลดมา ไปไว้ที่  
 “C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\kernel\win32”
  8. พิมพ์ “rtwintgt -install” ใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB เพื่อติดตั้ง RTWT kernel ก็เป็นอันเสร็จสมบูรณ์

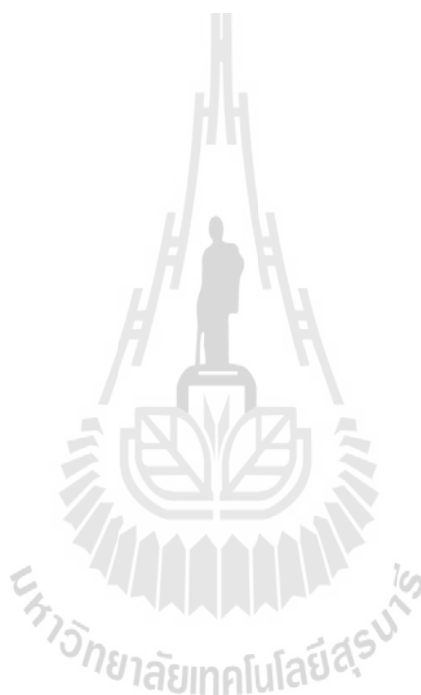
ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Boontan, T.,Srisertpol, J.,. Load Torque Estimation Exerted on Joints of Robotic Arm Using Adaptive Compensation. **The 8 National conference on Engineering & Technical Education**, CD TechEd8, NCTechED08TME07, 7pp. 26-27 November 2015, Bangkok, Thailand.





การประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์  
โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้  
Load Torque Estimation Exerted on Joints of Robotic Arm using Adaptive Compensation

ธนากร บุญทัน และ จิระพล ศรีเสริฐผล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนน มหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000  
E-mail: thanakorn.boontan@seagate.com Telephone 080-4040644

บทคัดย่อ

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการนำแขนกลของหุ่นยนต์มาใช้ในสายการผลิตเป็นจำนวนมาก การทำงานของแขนกลหุ่นยนต์จำเป็นต้องอาศัยแรงบิดบนข้อต่อที่สัมพันธ์กับการขับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจะส่งผลกระทบถึงการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการขับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่และอายุการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์ได้ ในทางปฏิบัติแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensation) เพื่อประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ที่เกิดขึ้น เมื่อเราสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในขณะเคลื่อนที่ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ไม่ให้ภาระโหลดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป

**คำสำคัญ:** การประมาณแรงบิดโหลด, การชดเชยแบบปรับตัวได้, ตัวสังเกต

Abstract

Currently, the robotic arm use to be a lot on the line production in the most industrial. Robotic arm are movement dependent on the torque relative of the motor drive. Whenever have to change the parameter, load torque value are affect to the work load operation of the robot arm. This procedure to affect in to the energy loss of electric motors driving in movement and decrease lifetime of the robot arm. In practice, the change process of load torque cannot estimate measurement directly. This paper presents a method adaptive compensation for estimating the load torque exerted on the robot arm. The result of method can design the trajectory movement of the robotic arms, and do not overload of the joint work. Have produce in developing the performance of the robot arm.

**Keyword:** Load Torque Estimation, Adaptive Compensation and Observer.

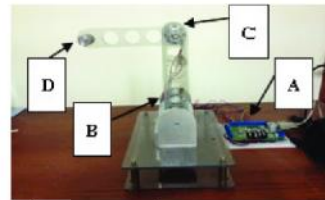
## 1. บทนำ

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักมีการนำขนกของหุ่นยนต์มาใช้ในสายการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่นอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมประกอบเครื่องจักร และอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เป็นต้น การทำงานของแขนกลหุ่นยนต์จำเป็นต้องอาศัยแรงบิดบนข้อต่อที่สัมพันธ์กับการขับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ ในการใช้งานจริงระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับผลกระทบจากค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (Variable Torque) เกิดขึ้นอยู่เสมอ ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง ระบบควบคุมโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้วิธีการเพิ่มค่าสัญญาณควบคุมและกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ เพื่อควบคุมการตอบสนองให้เป็นไปตามต้องการทั้งในส่วนของแรงบิด และความเร็วรอบในกรณีที่มีความเปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ โดยไม่มีการพิจารณาในส่วนขอค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจึงมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจะส่งต่อการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการขับของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่และอายุการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์ได้ ในทางปฏิบัติแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensation) เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่กระทำบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเราสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่กระทำบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่เคลื่อนที่ จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไม่ให้เกิดแรงบิดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และเป็นเพิ่มอายุการใช้งานของหุ่นยนต์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

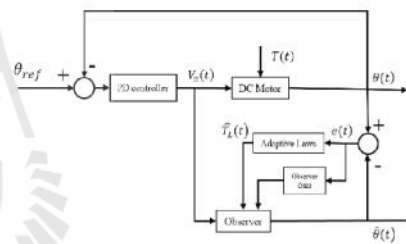
การทดลองการประมาณค่าแรงบิดที่กระทำบนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ จะใช้มอเตอร์กระแสตรงอุปกรณ์กระตุ้น (Actuator) ของแขนกลหุ่นยนต์สำหรับการทดลอง และทำการ

ประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 : แขนกลหุ่นยนต์สำหรับประมาณค่าแรงบิดโหลด  
A=Control board, B=DC motor joint1,  
C=DC motor joint2 และ D=Weight

แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการหมุนของข้อต่อ ดังแสดงในภาพที่ 2 จะประกอบด้วย ตัวควบคุมแบบพีดี มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และ โครงสร้างของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าแรงบิดโหลด



ภาพที่ 2 : แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการหมุนของข้อต่อ

จากแผนภาพการทำงานของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับตัวสังเกตเพื่อประมาณแรงบิดโหลดนี้ ได้ใช้ในการหาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองสถานการณ์ของระบบต่างๆ ดังนี้

### 2.1 ระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตแบบอันดับเต็ม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีหลักการทำงานโดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงทางกลเกิดขึ้น โดยการควบคุมด้วยวิธี Armature control



ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature circuit) เพื่อการควบคุมความเร็วรอบโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจรสนาม (Field circuit) คงที่ จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากกระแสให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์คงที่ตามไปด้วย พิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

$$I\dot{\omega} = -b \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L \quad (2)$$

$$V_a - V_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (3)$$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BV_a + HT_L \quad (4)$$

$$y = Cx$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากสมการ (1), (2) และ (3) จัดให้อยู่ในรูปของสมการ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} T_L$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix}$$

และตัวสังเกตอันดับเต็มของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สมการที่ 5

$$\frac{dx}{dt} = A\hat{x} + BV_a + HT_L + Le \quad (5)$$

$$y = C\hat{x}$$

$$\text{เมื่อ } e = y - C\hat{x} = \theta - \hat{\theta}$$

โดยกำหนดให้ค่าที่มิสัญลักษณ์  $\hat{\cdot}$  คือค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้จากการประมาณค่าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่า  $e$  คือ ค่าความผิดพลาดของค่ามุมของการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นระหว่างมอเตอร์กระแสตรงและตัวสังเกต

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{I} & \frac{K_t}{I} \\ 0 & -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} T_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e$$

$$\hat{y} = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i_a \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อย ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )

$K_t$  คือค่าคงที่ของแรงบิด ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$ )

$K_b$  คือค่าคงที่ของ Electromotive Force ( $\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ )

$T_L$  คือแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )

$b$  คือความหน่วง ( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ )

$R_a$  คือความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ( $\Omega$ )

$L_a$  คือความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

$i_a$  คือกระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)

$\omega$  คือความเร็วรอบ (rad/s)

$\theta$  คือขนาดของมุมองศา (Degree)

$V_a$  คือความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)

$V_b$  คือความต่างศักย์ back emf (V)

$L_1, L_2, L_3$  คือค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

## 2.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟีด

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีเข้าที่พุดคือตำแหน่งมุมของการเคลื่อนที่และอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้า พบว่าเป็นระบบอันดับ 1 (type-1) ซึ่งมีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน

$$G(s) = \frac{K_t}{s[L_a L_s^2 + (R_a I + L_a b)s + (R_a b + K_t K_b)]}$$

จากระบบอันดับ 1 เมื่อพิจารณาแบบควบคุมวงปิดที่สถานะคงตัวนั้น เมื่อให้สัญญาณขั้นบันได ค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบควบคุมแบบฟีด เพื่อปรับปรุงการตอบสนองชั่วคราวให้ดีขึ้น

โดยทั่วไป ตัวควบคุมแบบฟีด สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ดังแสดง

$$G_c(S) = K_p + K_d s \quad (6)$$

ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดขึ้นก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น

### 2.3 การประมาณแรงบิดโพลที่เปลี่ยนแปลงโดยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

ตัวสังเกตไม่สามารถประมาณแรงบิดโพลภายนอกได้ ที่มากระทำในระบบมอเตอร์กระแสตรงได้จึงจำเป็นต้องสร้างตัวชดเชยแรงบิดโพลให้กับตัวสังเกต โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method ซึ่งหลักการในการทำงานคือ ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อให้ความแตกต่างของอัตราหาค่าของแบบจำลอง และระบบที่ควบคุมมีค่าลดลง

โดยมีรายละเอียดและการพิสูจน์ทฤษฎี[4] ดังนั้น หลักการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ คือการปรับค่าตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) โดยให้ Loss Function ( $J$ )

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2$$

เมื่อ  $e = \theta - \hat{\theta}$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ( $\hat{T}_L$ ) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function ( $J$ ) คือ

$$\frac{d\hat{T}_L}{dt} = \gamma \frac{dJ}{d\hat{T}_L} = -\gamma e \frac{de}{d\hat{T}_L}$$

โดยที่  $\gamma$  คือ อัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{d\hat{\theta}}{d\hat{T}_L}$$

เมื่อตัวแปรปรับค่า ( $\hat{T}_L$ ) มีการเปลี่ยนแปลง ต้องการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{dv}{dt} + a_1 v = -\alpha_1 \quad (7)$$

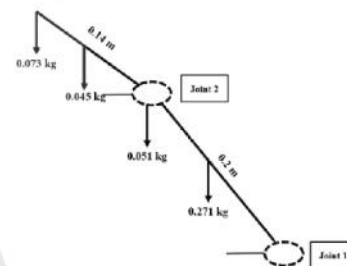
$$\text{กำหนดให้ } a_1 = \left[ \frac{R_b b}{L_n I} + \frac{K_b K_t}{L_n I} \right], a_2 = \left[ \frac{R_b}{L_n} + \frac{b}{I} \right], \alpha_1 = \frac{R_b}{L_n I}$$

### 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบการประมาณแรงบิดโพลที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ ประกอบด้วย 1.

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2. แขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ 2. บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) 4. PCI Serial Card 5. โปรแกรม MATLAB/Simulink

ทำการทดลองโดยการเขียนอัลกอริทึมของตัวควบคุมและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับตัวสังเกต ด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์โดยการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์กับส่วนที่เป็นแขนกลหุ่นยนต์ทั้ง 2 ข้อต่อ และรับสัญญาณป้อนกลับจากเซ็นเซอร์ด้วย RAPCON Board และทำการประมาณแรงบิดโพลที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ ข้อมูลสภาพของแขนกลหุ่นยนต์สำหรับการทดลอง แสดงดังในภาพที่ 3



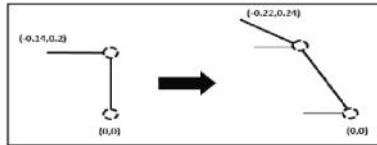
ภาพที่ 3 : ข้อมูลสภาพสำหรับแขนกลหุ่นยนต์

การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ จะพิจารณาการเคลื่อนที่เริ่มต้นจากตำแหน่ง (-0.14, 0.2) ไปยังตำแหน่ง (-0.22, 0.24) ซึ่งข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก 90° ไปยังตำแหน่ง -30° และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0° ไปยังตำแหน่ง 60° ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยแต่ละข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์จะมีตัวควบคุมแบบพีดี 2 ชุด และกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

**กรณีที่ 1** ข้อต่อที่ 1 และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่พร้อมกัน

**กรณีที่ 2** ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที

**กรณีที่ 3** ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่ก่อน และข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที



ภาพที่ 4 : การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สององศาอิสระ

#### 4. ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบ การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนที่ โดยพิจารณาแบบควบคุมมุมของมอเตอร์แบบระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีดี พร้อมทั้งผลการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งเราใช้มอเตอร์รุ่นเดียวกันทั้งสองข้อต่อ สำหรับค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์นั้นได้จากรายละเอียดของมอเตอร์และการทดสอบจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ดังแสดงในตารางที่ 1

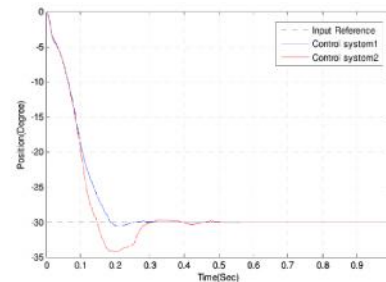
ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Parameter	ข้อต่อที่ 1 และ ข้อต่อที่ 2 (Value)
$I$	$3.67 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$K_t$	$1.253 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}$
$L_a$	$9.52 \times 10^{-2} \text{ H}$
$b$	$0.0423 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{red}$
$R_a$	$4.7 \Omega$
$K_p$	$1.49 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{red}$

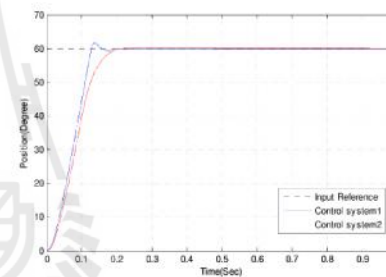
ในการออกแบบตัวควบคุมมุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีจำนวน 2 ชุด ข้อต่อ 1 ข้อต่อ โดยข้อต่อที่ 1 จะเริ่มต้นหมุนไปทางซ้ายที่ตำแหน่ง  $-30^\circ$  องศา ผลตอบสนองการควบคุมมุมของระบบควบคุม 2 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 5 และข้อต่อที่ 2 จะเริ่มต้นหมุนไปทางขวาที่ตำแหน่ง  $60^\circ$  องศา ผลตอบสนองการควบคุมมุมของระบบควบคุม 2 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 6

ค่าตัวแปรของ  $K_p$  และ  $K_d$  ของตัวควบคุมแบบพีดีแต่ละข้อต่อและระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง จะมี

รายละเอียดของผลการตอบสนองของระบบควบคุมแต่ละชุดต่ออินพุตแบบขั้นบันได (Step input) ซึ่งประกอบด้วย Rise time ( $t_r$ ), Settling time ( $t_s$ ) Percent overshoot ( $M_p$ ) ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 5 : ผลการตอบสนองการควบคุมข้อต่อที่ 1



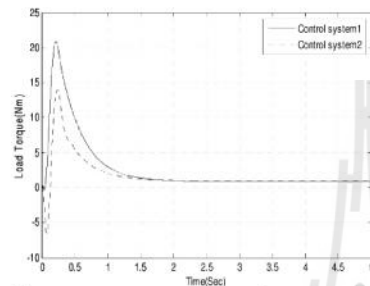
ภาพที่ 6 : ผลการตอบสนองการควบคุมข้อต่อที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีดีและผลการตอบสนองการควบคุมมุมในการเคลื่อนที่

ข้อต่อที่	ระบบควบคุมชุดที่	$K_p$	$K_d$	$t_r$ (sec)	$t_s$ (sec)	$M_p$ (%)
1	1	5.87	0.1943	0.18	0.28	4.66%
	2	15.67	0.1647	0.20	0.36	13.70%
2	1	2.33	0.0134	0.14	0.21	3.04%
	2	0.543	0.0345	0.18	0.25	-

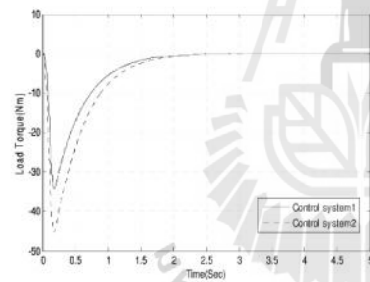
#### 4.1 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 1

ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อ 1 และข้อต่อที่ 2 โดยข้อต่อที่ 1 และ ที่ 2 เกิดการเคลื่อนที่พร้อมกัน ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8



ภาพที่ 7 : ผลตอบสนองแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณี

1

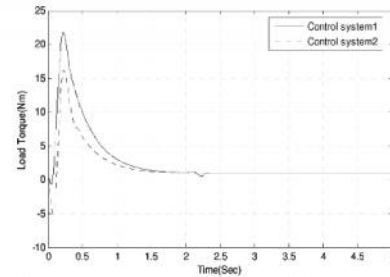


ภาพที่ 8 : ผลตอบสนองแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณี

1

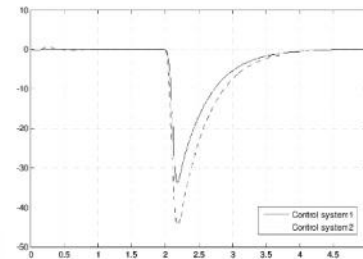
#### 4.2 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 2

ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อ 1 และข้อต่อที่ 2 โดยข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่ก่อนและข้อต่อที่ 2 จะเริ่มการเคลื่อนที่หลัง 2 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



ภาพที่ 9 : ผลตอบสนองแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณี

2

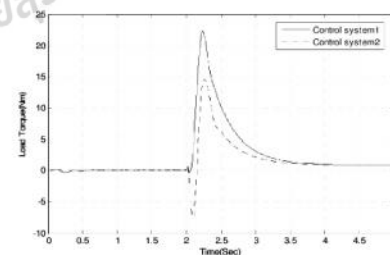


ภาพที่ 10 : ผลตอบสนองแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณี

ที่ 2

#### 4.3 ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำต่อข้อต่อ สำหรับกรณีที่ 3

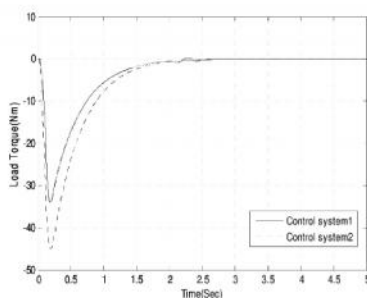
ผลการประมาณแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อ 1 และข้อต่อที่ 2 โดยข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่ก่อนและข้อต่อที่ 1 จะเริ่มการเคลื่อนที่หลัง 2 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 11 และ 12



ภาพที่ 11 : ผลตอบสนองแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 1 สำหรับกรณี

ที่ 3





ภาพที่ 12 : ผลตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำที่ข้อต่อที่ 2 สำหรับกรณี  
ที่ 3

ผลการทดลองการเคลื่อนที่ทั้ง 3 กรณี การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 3 กับตัวควบคุมชุดที่ 1 ประมาณ 22.33 Nm และการประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่าแรงบิดโหลดสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ 1 กับตัวควบคุมชุดที่ 2 ประมาณ 45.57 Nm โดยแรงบิดโหลดที่ได้จากการคำนวณที่สภาวะคงตัวของข้อต่อที่ 1 เท่ากับ 0.8617 Nm และข้อต่อที่ 2 เท่ากับ 0.1135 Nm

ตารางที่ 3 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 1

กรณี	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	20.80	0.8167
	2	13.98	0.9557
2	1	21.81	0.8799
	2	16.07	0.8934
3	1	22.33	0.9276
	2	14.58	0.9182

ตารางที่ 4 การประมาณค่าแรงบิดโหลดที่กระทำบนข้อต่อที่ 2

กรณี	ตัวควบคุมชุดที่	Max load torque (Nm)	Steady state load torque (Nm)
1	1	34.26	0.1173
	2	45.11	0.1104
2	1	33.75	0.1091
	2	44.57	0.1107
3	1	33.97	0.1304
	2	45.04	0.1135

## 5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถประมาณแรงบิดโหลดในการเคลื่อนที่ของแขนกลได้โดยไม่ต้องตั้งเซ็นเซอร์เพิ่มเติม ผลการตอบสนองของแรงบิดโหลดที่กระทำต่อข้อต่อในช่วงการตอบสนองชั่วครู่ของตัวควบคุมที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดค่าแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกัน

ข้อมูลของการประมาณค่าของแรงบิดโหลดที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ จะเป็นแนวทางพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมและเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไม่ให้ภาระโหลดเกินกระทำต่อข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ จะสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของระบบแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยของ System & Control Engineering Laboratory และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jong Sun Ko, Young Seok Jung, Sung Kwun Kim and Myung Joong Youn, 1995. MRAC Load Torque Observer for Position Control of Brushless DC Motor. Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.622-627.
- [2] Kichul Hong and Kwanghee Nam, 1998. A Load Torque Compensation Scheme under the Speed Measurement Delay. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.45, Issue 2, pp.283-290.
- [3] Ki-Hong Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn and Dong-Seok Hyun, 2003. Speed Control of High-Performance Brushless DC Motor Drives by Load Torque Estimation. Proceeding of IEEE Power Electronics Specialist Conference, Vol.4, pp.1677-1681.
- [4] Srisertpol, J., and Khajorntraidee, C. 2009. Estimation of DC Motor Variable Torque using Adaptive Compensation. Proceedings of the 21st Annual International Conference on Chinese Control and Decision, pp.767-772.
- [5] Ata SEVINC, 2003. A Full Adaptive Observer for DC Servo Motors. Turk Journal Electrical Engineering, Vol.11, pp.117-130.
- [6] Chan-Ki Kim, Hong-Woo Rhew and Yoon-Ho Kim, 1997. Robust Speed Control of PMSM using Kalman Filter Load Torque Observer. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol.2, pp.918-924.

## ประวัติผู้เขียน

นายชนากร บุญทัน เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อ พ.ศ. 2553 และในปี พ.ศ. 2555 ได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล(แมคคาทรอนิกส์) ขณะศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้ทำงานอยู่บริษัท Seagate technology (Thailand) Ltd. แผนก Advanced Manufacturing Engineering (AME) ระหว่างศึกษาระดับมหาบัณฑิตได้นำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง Load Torque Estimation Exerted on Joints of Robotic Arm Using Adaptive Compensation ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 8 ในระหว่างวันที่ 26 – 27 พฤศจิกายน 2558 ณ กรุงเทพมหานคร มีรายละเอียดดังภาคผนวก ง.

